ISSN 1405-0471

Madera y Bosques



INSTITUTO DE ECOLOGIA, A.C.

PRIMAVERA 2012 18(1)
Xalapa, Ver.

MADERA y BOSQUES
Vol. 18 Núm. 1 **Primavera de 2012**

Madera y Bosques, es una publicación del Instituto de Ecología, A.C., que edita la Red de Ambiente y Sustentabilidad. Los trabajos que publica tratan los temas de tecnología de productos forestales y del campo forestal en general, con énfasis en ecología forestal y manejo forestal. Se aceptan trabajos en español, inglés y ocasionalmente en otros idiomas. Su objetivo principal es constituirse en un medio de difusión de la investigación científica. Asimismo, publica contribuciones técnicas y estados del arte que incidan en el medio nacional e internacional. Es una publicación trimestral que aparece en primavera, en verano, en otoño y en invierno.

Madera y Bosques, Vol. 18 Núm. 1 de 2012. Número de Certificado de Reserva otorgado por el Instituto Nacional del Derecho de Autor: 04-2005-062018152600-102. Número de Certificado de Licitud de Título: 12906. Número de Certificado de Licitud de Contenido: 10479. Domicilio de publicación: Carretera Antigua a Coatepec núm. 351. El Haya. 91070 Xalapa, Ver., México. Imprenta: Cromoeditores S.A. de C.V., Miravalles 703. Col. Portales 03300 México, D.F.
La suscripción anual para 2012 es de $450.00+$225.00 para gastos de envío al interior de la República y $50.00 USD al extranjero (no incluye gastos de envío). Precio por ejemplares sueltos $200.00 y $20.00 USD, respectivamente. Incluye costos de envío por correo aéreo. Suscripciones en México en International Magazine Subscriptions, Tenochtitlan núm. 26 L10 M7, Ampl. Tlacuitlapa, 01650 México, D.F. México, Tel/Fax (55) 5643-2939, ce:mmaximomx@yahoo.com.mx. Donaciones e intercambios, en el Instituto de Ecología, A.C., al c.e:libros@inecol.edu.mx. La reproducción total o parcial de los artículos podrá hacerse con el permiso expreso de los editores. Esta revista forma parte de los índices y portales de difusión ISI Web of Science (Science Citation Index Expanded), Journal of Citation Records (JCR), Revistas Mexicanas de Investigación en Ciencia y Tecnología (IRMICyT) del CONACYT, Redalyc, Dialnet, Periódica, Índice Iberoamericano de Información en Ciencia y Tecnología, SCOPUS, Actualidad Iberoamericana, CAB Forest Products Abstracts, Latindex y Seriunam.

MADERA Y BOSQUES

Vol.18 Núm. 1 Primavera de 2012

CONTENIDO

Editorial **3**

Artículos de investigación

Caracterización dasométrica e índice de sitio
en plantaciones de caoba en Tabasco, México
Guadalupe Pérez González, Marivel Domínguez-Domínguez,
Pablo Martínez-Zurimendi y Jorge D. Etchevers Barra ***7***

Modelos de biomasa aérea y foliar en una plantación de pino
de rápido crecimiento en Oaxaca
Gerardo Rodríguez-Ortiz, Héctor M. De Los Santos-Posadas,
Víctor A. González-Hernández, Arnulfo Aldrete,
Armando Gómez-Guerrero y Aurelio M. Fierros-González ***25***

La madera de cinco especies de *Zanthoxylum* L. (Rutaceae)
con distribución en México
Fernanda Arenas Flores, Agustina Rosa Andrés-Hernández,
Teresa Terrazas y Carlos Castañeda ***43***

El impacto del huracán Dean sobre la estructura y composición
arbórea de un bosque manejado en Quintana Roo, México
Angélica Navarro-Martínez, Rafael Durán García
y Martha Méndez-González ***57***

Estimación de la densidad de madera en árboles de comunidades
forestales templadas del norte del estado de Durango, México
Flor Maria Silva-Arredondo
y José de Jesús Návar-Cháidez ***77***

Guía de autores



Nuestra portada: Selva de Xhazil Sur, Quintana Roo, dañada por el huracán Dean.

Autor: María Angélica Navarro Martínez.

MADERA Y BOSQUES

Vol.18 Num. 1 Spring 2012

TABLE OF CONTENTS

Editorial ***3***

Research papers

Dasometric characterization and site index in mahogany plantations in Tabasco, Mexico
Guadalupe Pérez González, Marivel Domínguez-Domínguez, Pablo Martínez-Zurimendi y Jorge D. Etchevers Barra ***7***

Above-ground and needle biomass models on a fast-growing pine plantation in Oaxaca
Gerardo Rodríguez-Ortiz, Héctor M. De Los Santos-Posadas, Víctor A. González-Hernández, Arnulfo Aldrete, Armando Gómez-Guerrero y Aurelio M. Fierros-González ***25***

The wood of five species of *Zanthoxylum* L. (Rutaceae) with distribution in Mexico
Fernanda Arenas Flores, Agustina Rosa Andrés-Hernández, Teresa Terrazas y Carlos Castañeda ***43***

The impact of the hurricane Dean on the structure and arboreal composition of a managed forest in Quintana Roo, Mexico
Angélica Navarro-Martínez, Rafael Durán García y Martha Méndez-González ***57***

Estimating bole wood specific gravity in trees of temperate forest communities of northern Durango, Mexico
Flor María Silva-Arredondo y José de Jesús Návar-Cháidez ***77***

Author´s guide



Our cover: Forest of Xhazil Sur, Quintana Roo, damaged by the hurricane Dean.

Author: María Angélica Navarro Martínez.

EDITORIAL

México enfrenta decisiones complejas para este año 2012, muchas de ellas de caracter político. En este ámbito, las decisiones de la sociedad mexicana son de primer orden, pues se refieren al cambio en la presidencia de la República y a la renovación total del Congreso de la Unión, amén de varias importantes gubernaturas, entre ellas, la Jefatura de Gobierno del Distrito Federal. Quien quiera que gane las elecciones tendrá retos monumentales que atender, del tamaño de un gran país como México que, si bien, puede presumir importantes logros en desarrollo de su infraestructura y en otros temas de importancia semejante, a la vez, arrastra un enorme déficit en muchas áreas. Temas referentes a la educación, la creación de empleos, la seguridad pública, las relaciones exteriores con otros países del mundo destacan entre los más importantes asuntos que ocuparán la agenda de quienes tengan en sus manos la conducción del país y la elaboración de las leyes que lo rigen. Para los que trabajamos en asuntos relacionados con la ciencia, la tecnología, el desarrollo tecnológico y la innovación, es de la mayor relevancia informarse y aportar ideas para que sean tomadas en cuenta en la generación de políticas públicas. Para los lectores de esta revista, los nombramientos de quienes encabecen la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, la Comisión Nacional Forestal y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología resultarán del mayor interés, puesto que su trabajo se lleva a cabo en áreas coordinadas por los titulares de estas dependencias. Será necesario mantenerse informado y atento a estos desarrollos para poder influir, en el mejor de los sentidos, en las prácticas y políticas que emanen de estas dependencias.

En este número incluimos cinco trabajos del mayor interés tecnológico y científico. El primero versa sobre una caracterización dasométrica en plantaciones de Swietenia macrophylla *King, en parcelas permanentes establecidas en la región tropical de México. Con base en esta caracterización se determinó que las plantaciones con mayor productividad se encuentran en la zona de La Chontalpa. El modelo de Korf presentó mejor coeficiente de determinación, con alta confiabilidad para realizar la estimación de crecimiento en altura en árboles de la especie estudiada. Con la ecuación obtenida se determinó la evolución de la altura dominante con la edad y el índice de sitio para cada una de las plantaciones. A partir de los resultados obtenidos se puede considerar el potencial productivo de esta especie para futuros establecimientos en las zonas con mayores posibilidades.*

Otro estudio trata acerca de la estimación de la biomasa de acículas en ramas individuales y árbol completo, y ajustar modelos de partición de biomasa aérea en árboles plantados de Pinus patula *Schl. et Cham. La biomasa de acículas por rama se estimó con un modelo lineal, que empleó área basal de rama viva, altura de rama y el seccionamiento de copa como variables independientes. La biomasa de los componentes aéreos se pudo estimar con altos coeficientes de determinación para madera con corteza, ramas y acículas. La biomasa total aérea por árbol se estimó con un* $R^2 = 0,87$*.*

En otro trabajo se describen y comparan las características anatómicas de la madera de cinco especies de Zanthoxylum*. Los caracteres cualitativos y cuantitativos de la madera se analizaron a través de análisis multivariados con la finalidad de conocer si existen*

caracteres que contribuyan a distinguirlas o agruparlas en las secciones reconocidas para el género. Las especies comparten ciertos caracteres diagnósticos del género: pared de elementos de vaso, punteaduras alternas, fibras libriformes y parénquima marginal en bandas. Las cinco especies tienen porosidad semianular que las distingue de otras especies de Zanthoxylum *con porosidad anular. Se registran, por primera vez para el género, drusas en vasos y fibras septadas. Los resultados del análisis de componentes principales y el fenograma mostraron que las cinco especies son entidades diferentes con una combinación de caracteres única y que los caracteres de la madera no sustentan las secciones. El diámetro de los vasos y la longitud y diámetro de las fibras parecen estar relacionadas con el tipo de vegetación donde crecen las especies.*

El siguiente estudio analiza los efectos del huracán Dean en la vegetación forestal de las selvas de Quintana Roo. Este huracán afectó alrededor de 900,000 ha de la selva mediana subperennifolia, en el centro-sur de ese estado. En este estudio se cuantifican los daños ocasionados sobre la vegetación y se analizan los cambios en la composición de especies y la estructura del bosque afectado por el huracán. Se encontró que la composición del bosque no fue afectada significativamente y que el mayor efecto del huracán fue sobre la estructura del bosque. Los árboles más dañados corresponden a individuos de especies del sotobosque. Los principales tipos de daño fueron desramado, desenraizado y quebrado o ruptura del tronco. Asimismo, basados en fuentes bibliográficas y algunas observaciones durante el trabajo en campo, se discute el efecto que el aprovechamiento forestal puede tener en cuanto a incrementar la susceptibilidad de estos bosques al daño por viento. Se propone disminuir la cantidad de áreas de concentración de madera (bacadillas) durante la extracción forestal, así como incorporar a los planes de manejo forestal, el aprovechamiento de árboles dañados que ofrezcan alguna utilidad. También se propone el monitoreo a largo plazo de la dinámica de los bosques afectados en relación con los no afectados por huracanes.

Finalmente, el objetivo de la última investigación integrada al número fue el de estimar la densidad básica de la madera y su nivel de variación con la altura y el diámetro en árboles de varias especies de los géneros Pinus *y* Quercus *del norte del estado de Durango, México. Para esto se tomaron especímenes a diferentes alturas del fuste y en diferentes secciones diamétricas de un muestreo aleatorio. Los resultados muestran que la densidad básica es estadísticamente diferente entre los componentes de albura y duramen y la altura relativa del fuste en el género* Pinus, *mientras que para el género* Quercus *no se encontraron diferencias estadísticamente significativas con los componentes de la madera o con la altura relativa. Los cálculos matemáticos indican que la densidad básica se debe de estimar a una altura dada por 0,22H y no a 1,3 m.*

Tenemos la convicción de que estos artículos contribuirán de manera sustantiva a incrementar el conocimiento de los bosques mexicanos y, por ende, ayudarán, aunque sea de manera modesta, a lograr ese gran objetivo nacional antes mencionado que es el de incrementar los niveles de calidad de vida, cuando menos de un sector de los habitantes de México.

Raymundo Dávalos Sotelo
Editor

EDITORIAL

Mexico faces complex decisions for this year 2012, many of them of a political nature. In this area, Mexican society decisions are of the greatest importance, as they relate to the change in the Presidency of the Republic and the total renewal of the Congress of the Union, not to mention several important governorships, including the head of Government of the Federal District. Whoever wins the election will have monumental challenges to take care of, of the size of a large country such as Mexico which, although it can boast significant achievements in infrastructure development and other issues of similar importance, at the same time, carries an enormous deficit in many areas. Issues relating to education, job creation, public security, foreign relations with other countries in the world stand out among the most important issues that will occupy the agenda of those who have in their hands the leadership of the country and the development of laws that govern its inhabitants. For those of us who work on matters related to science, technology, technological development and innovation, it is of the greatest importance to keep informed and to put forward ideas so that they are taken into account in the generation of public policies. For the readers of this magazine, the appointments of those who will lead the Secretariat of Environment and Natural Resources, the National Forestry Commission and the National Council of Science and Technology will be of the highest interest, since their work is carried out in areas coordinated by the holders of these offices. It will be necessary to stay informed and attentive to these developments to be able to influence, in the best sense, the practices and policies that emanate from these ministries.

In this issue we include five works of the greatest scientific and technological interest. The first is about a dasometric characterization in plantations of Swietenia macrophylla *King, in permanent plots established in the tropical region of Mexico. Based on this characterization it was determined that plantations with increased productivity are located in the area of The Chontalpa.The Korf model presented the best determination coefficient, with high reliability for the estimation of growth in height in trees of the species. With the equation obtained the evolution of the dominant height with age and site index was determined for each of the plantations. From the results obtained, the productive potential of this species for future settlements in the zones with the greatest possibilities can be considered.*

Another study deals with the estimation of biomass of needles in individual branches and the entire tree, to adjust models of aboveground biomass partition in trees planted of Pinus patula *Schl. et Cham. The biomass of needles per branch was estimated with a linear model that employed the basal area of living branch, branch height and the sectioning of cup as independent variables. The biomass of the aerial components could be estimates with high coefficients of determination for wood with bark, branches and needles. The total aboveground biomass per tree was estimated with a* $R^2 = 0,87$.

In another work the anatomical characteristics of Zanthoxylum *wood species are described and compared. The qualitative and quantitative characters of wood were analyzed through multivariate analysis with the purpose of knowing if there are characters that help to distinguish them or group them into sections known for the genus. The species share certain diagnostic characters of the genus: wall of vessel elements, alternate pits, libriform fibers and marginal parenchyma bands. The five species have semi-ring porous*

that makes them different from other Zanthoxylum *species thata ara ring-porous. There are recorded, for the first time for the genus drusen in vessels and septate fibres. The results of the principal components analysis and the phenetic diagram showed that the five species are different with a unique combination of character entities and that the character of the wood does not support the current established sections. The diameter of the vessels and the length and diameter of the fibers seem to be related to the type of vegetation where the species grow.*

The following study analyzes the effects of Hurricane Dean in the forest vegetation of the forests of Quintana Roo. This hurricane hit around 900,000 hectares of semi-evergreen forest, in the center-south of the state. This study quantifies the damage caused on the vegetation and discusses changes in species composition and structure of the forest affected by the hurricane. It was found that the composition of the forest was not affected significantly and that the greatest impact of the hurricane was about the structure of the forest. The most damaged trees are individuals of species of the understory. The main types of damage were limb loss, uprooting and broken or breaking of the trunk. Also, based on bibliographic sources and observations during field work, the authors discuss the effect that forest exploitation can have on the increase in susceptibility of these forests to damage by wind. It is recommended to reduce the number of areas of concentration of wood during forest extraction, as well as incorporating to plans of forest management, the use of damaged trees. It is also proposed to monitor the long-term dynamics of the affected forests in relation to those not affected by hurricanes.

Finally, the objective of the last research paper in this journal issue was to estimate wood basic density and the level of variation with height and diameter of trees of various species of the genera Pinus and Quercus in the north of the state of Durango, Mexico. To achieve this, specimens were taken at different heights of the bole and at different diameter sections in random sampling. The results show that the basic density is statistically different between the components of sapwood and heartwood and the relative height of the trunk in the genus Pinus, while for the Quercus genus no statistically significant differences were found between the wood components or between relative height. The mathematical calculations indicate that the basic density should be estimated at a height given by 0,22 H and not to 1,3 m.

We are convinced that these articles will contribute substantially to increase the knowledge of the Mexican forests and therefore, will help, albeit modestly, to achieve that great national goal referred to above which is to increase the levels of quality of life at least of a sector of the inhabitants of Mexico.

Raymundo Dávalos Sotelo
Editor

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Caracterización dasométrica e índice de sitio en plantaciones de caoba en Tabasco, México

Dasometric characterization and site index in mahogany plantations in Tabasco, Mexico

Guadalupe Pérez González[1], Marivel Domínguez-Domínguez[2*], Pablo Martínez-Zurimendi[3,4] y Jorge D. Etchevers Barra[5]

RESUMEN

Se hizo una caracterización dasométrica y se determinó la calidad de sitio, en ocho plantaciones de *Swietenia macrophylla* King, en parcelas permanentes establecidas en el trópico de México. Las plantaciones estudiadas presentaban edades de 7 a 16 años, densidades de establecimiento de plantación de 156 árb.ha^{-1} a 1111 árb.ha^{-1}; la supervivencia de 40% a 100%, altura dominante de 4,39 m a 23,45 m, área basal de 2,3 m²ha^{-1} a 15,7 m²ha^{-1}, volumen de madera con corteza de 14 m³ha^{-1} a 185 m³ha^{-1}, índice de Reineke de 176 a 505. Con base en la caracterización dasométrica se determinó que las plantaciones con mayor productividad se encuentran en la zona de La Chontalpa. Para determinar la calidad de sitio de estas plantaciones se probaron modelos de Bertalanffy, Chagoya, Logística, Monomolecular, Weibull, Korf y Wescom. El modelo de Korf presentó mejor coeficiente de determinación con alta confiabilidad para realizar la estimación de crecimiento en altura en árboles de la especie estudiada. Con la ecuación obtenida se determinó la evolución de la altura dominante con la edad y el índice de sitio para cada una de las plantaciones. Los índices de sitio para *Swietenia macrophylla* King en el estado de Tabasco se clasificaron como: baja (11,5 m), media (14,5 m) y alta (17,5 m) con edad base de 10 años. A partir de los resultados obtenidos, se puede considerar el potencial productivo de esta especie para futuros establecimientos en las zonas con mayores posibilidades.

PALABRAS CLAVE:
La Chontalpa, modelo de Korf, supervivencia, *Swietenia macrophylla*, Trópico de México.

ABSTRACT

A dasometric characterization was made and the site quality was determined in eight mahogany plantations, in permanent plots established in the Tropical region of Mexico. Plantations studied were about 7 to 16 years old, starting densities of plantations from 156 to 1111 tree.ha^{-1}; survival from 40% to 100%, dominant height from 4,39 m to 23,45 m, basal area from 2,3 m²ha^{-1} to 15,7 m²ha^{-1}, volume

1 Programa docente de postgrado en Producción Agroalimentaria en el Trópico del Campus Tabasco del Colegio de Postgraduados. c.e.: lupi1904@hotmail.com
2* Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco, Perif. Carlos A. Molina, km. 3.5, carr. Cárdenas-Huimanguillo, AP 24, CP 86500, H. Cárdenas, Tabasco, México, mdguez@colpos.mx Autor para correspondencia.
3 Sustainable Forest Management Research Institute UVa.INIA, ETS Ingenierías Agrarias, Universidad de Valladolid, Av. de Madrid núm. 57, 34007, Palencia, España.
4 Ecosur, Carretera Villahermosa-Reforma, km. 15.5, Ranchería Guineo, secc. II, CP 86280, Villahermosa, Tabasco. c.e.: pmartinez@ecosur.mx
5 Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, km. 36.5, carretera México-Texcoco, Montecillo, Estado de México, CP 56230. c.e.: jetchev@colpos.mx

of wood with bark from 14 m^2ha^{-1} to 185 m^3ha^{-1}, Reineke index from 176 to 505. With the dasometric characterization basis, it was determined that plantations with increased productivity are located in the area of Chontalpa. To determine the quality of mahogany plantations areas, several models were tested: Bertalanffy, Chagoya, Logistics, Monomolecular, Weibull, Korf and Wescom. The Korf model resulted in a best fit with a probability of ($\alpha \leq 0,05$). An equation was determined to evaluate the index site of mahogany, site index values for mahogany in the State of Tabasco were classified as: low (11,5 m), medium (14,5 m) and high (17,5 m) with a base of 10 year sold trees. With the basis of the obtained results, the potential productivity of this species may be considerer for future plantations in the areas with the greatest possibilities.

KEY WORDS:
La Chontalpa, Korf model, survival, *Swietenia macrophylla*, Tropic of Mexico.

INTRODUCCIÓN

Swietenia macrophylla King (caoba) y *Cedrela odorata* L. (cedro) son dos especies forestales del país que por su madera preciosa han sido sometidas a aprovechamiento intensivo, eso ha generado que se establezcan plantaciones para satisfacer la fuerte demanda de la industria maderera en México (Ramírez y Zepeda, 1994; Bravo, 2007). Las maderas preciosas, de estas y otras especies, apenas representan 0,5% de la producción maderable en México. Esta baja producción se ha debido a varios factores, entre ellos: la mini-fundización de las tierras que acompañó a los programas de colonización de los trópicos durante las décadas de los años sesenta y setenta del siglo pasado, los incendios y las plagas forestales que reducen la producción de madera. Todos estos factores han incidido en que los árboles de *S. macrophylla* y *C. odorata* sean escasos y de talla reducida (Challenger, 1998; Conafor, 2005). En México, a pesar de que *S. macrophylla* es una especie con alto valor económico, existe poca información cuantitativa acerca de su crecimiento, desarrollo y rendimiento, en plantaciones (García, 1998).

El éxito de una plantación forestal está fundamentado en el aumento en sus dimensiones: altura, diámetro, área basal y volumen maderable que determina su crecimiento en un periodo de tiempo determinado (Klepac, 1983). El manejo silvícola que se debe aplicar a las plantaciones forestales es importante para promover el crecimiento de los árboles y debe estar basado en mediciones dasométricas de la especie que consideran los incrementos en diámetro, altura y producción en volumen maderable. Los tratamientos silvícolas, tales como el aclareo, buscan mejorar la estructura del rodal y, lo más importante, incrementar el volumen útil en la corta final (Smith *et al*., 1997). En Tabasco se realizó un inventario forestal de las plantaciones de *S. macrophylla,* a partir del cual se generó una amplia base de datos que permitió analizar su crecimiento desde el año 2003 hasta el 2008. Con esa información se determinó el índice de sitio donde se desarrolla cada plantación.

OBJETIVOS

El presente trabajo tuvo como objetivo caracterizar dasométricamente altura, diámetro, área basal y volumen maderable de las plantaciones de *Swietenia macrophylla* King, en el estado de Tabasco, así como determinar el índice de sitio a través de un modelo de evolución de la altura dominante con la edad.

METODOLOGÍA

Localización del área de estudio

El estudio se realizó en el sureste de México, en el estado de Tabasco, en plan-

taciones de *S. macrophylla*, en los municipios de Cunduacán, Huimanguillo y Centla, ubicados entre las coordenadas, 18°39' y 17°15' de latitud norte; y 91° 00' y 94°07' de longitud oeste (INEGI, 2000; Fig. 1). De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por García (1988), el clima para la zona de estudio es (Af) cálido húmedo con lluvias todo el año y (Am) cálido húmedo con abundantes lluvias en verano. La temperatura media anual mínima es 22,5 ºC y máxima de 30,5 ºC. El régimen de precipitaciones varía desde los 1947 mm a los 2290 mm anuales (INEGI, 2005). Los suelos predominantes en la zona de estudio son Fluvisol éutrico gléyico (Fleugl), Cambisol ferrali gléyico (CMflgl) y Gleysol mólico (GLmo) (Palma *et al.*, 2008).

Determinación de la caracterización dasométrica

Para la realización de este estudio se dispuso de la información dasométrica consignada en el inventario de plantaciones de *S. macrophylla* en Tabasco, elaborado por la Comisión Estatal Forestal (Comesfor). Se analizaron datos de mediciones realizadas en los años 2003, 2004, 2005 y 2008, de la red de parcelas permanentes establecidas en ocho plantaciones de *S. macrophylla*, propiedad de los silvicultores.

Se midieron 21 parcelas permanentes, con 44 árboles en promedio, haciendo un total de 924 árboles. Los parámetros medidos fueron: la densidad



Figura 1. Localización de las plantaciones analizadas de *S. macrophylla* en Tabasco, México.

del arbolado, la superficie de las parcelas, la edad (años) y la sobrevivencia de los árboles. Se midió el diámetro normal (DBH) con una forcípula y la altura total de los árboles (HT) con una pistola Haga. Con los datos medidos en las parcelas permanentes se calcularon las siguientes variables: esbeltez, diámetro medio cuadrático, área basal, volumen de madera con corteza y árboles dominantes, de acuerdo con Assmann (1970). Se determinaron los índices de densidad del rodal de Reineke y el índice de Hart (Daniel *et al.,* 1982). El índice de Reineke refleja la competencia entre los árboles y por tanto la disponibilidad de recursos que tienen los árboles para continuar creciendo adecuadamente. A partir de los datos dasométricos de las plantaciones y de las curvas de índice de sitio (como se explica más abajo en este apartado) se clasificó la calidad de cada una de las plantaciones estudiadas. Para la medición de la densidad de las plantaciones se utilizaron tres índices: área basal, índice de densidad de rodal de Reineke e índice de Hart-Becking.

Área basal (AB)

Se obtuvo a partir del diámetro a 1,3 m de altura como la sección transversal correspondiente. Se expresa en m^2ha^{-1} (Avery y Burhart, 2002; Domínguez *et al.*, 2006):

$$AB = \frac{\left[\sum \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{DBH^2}{10000}\right)\right]}{S}$$

donde

DBH: diámetro a la altura del pecho en centímetros.

S: tamaño de la parcela en hectáreas.

Índice de densidad del rodal de Reineke (IDR)

Es un índice que expresa la medida cuantitativa de la densidad promedio que un rodal puede soportar, con referencia a un límite entre la relación del número de árboles por unidad de superficie y el tamaño promedio de los árboles para lograr un objetivo determinado; es independiente de la edad y de la calidad de sitio (Clutter *et al.*, 1983). Se expresa:

$$IDR = N \cdot \left(\frac{Dg}{25}\right)^{1,605}$$

donde

N: densidad de arbolado en árboles por hectárea.

Dg: diámetro medio cuadrático en centímetros.

El índice determina el número de árboles que existen en un rodal a través del estudio de un rodal puro, bien poblado y de edad uniforme con un diámetro medio cuadrático de 25 cm (Daniel *et al.,* 1982). Para determinar el índice del rodal, Reineke (1933) generó una ecuación que al graficarla representa un valor de la pendiente igual a 1,605, el cual se ha considerado como coeficiente general para las especies. Para la interpretación del IDR, Long (1985) define 60% de IDR máximo como el inicio de autoaclareo y 35% como límite de ocupación completo del sitio o estación.

El índice de Hart-Becking

Se define como la relación entre el espaciamiento medio del arbolado, calculado a partir de la densidad (N) y su altura dominante (Ad), expresada en porcentaje (Codina, 2003).

$$H = \frac{10000}{Ad * \sqrt{N}}$$

donde

H: índice de Hart-Becking en porcentaje.
Ad: altura dominante en metros.
N: densidad de arbolado en árboles por hectárea.

Análisis estadístico de la caracterización dasométrica

Se realizó un análisis estadístico de correlación para establecer el grado de asociación entre las variables dasométricas y seleccionar las variables a utilizar en los modelos en la determinación del índice de sitio. De las variables que presentaron alta correlación se seleccionaron las que mejor se ajustaban en el modelo. También se realizó un análisis de varianza y una prueba de comparación de medias mediante Student-Newman-Keuls con α = 0,05 de las variables dasométricas, diámetro a la altura del pecho, diámetro medio cuadrático, altura total, esbeltez, área basal y volumen maderable con corteza.

Determinación del índice de sitio

Métodos para construir familias de curvas de índice de sitio
El índice de sitio es una representación gráfica que describe la relación altura dominante-edad de un rodal o árboles individuales y define el grado de productividad de un lugar. Para este estudio se aplicó el método de curva guía, el cual consiste en ajustar en forma analítica un modelo matemático para obtener una curva promedio o curva guía en todo el intervalo de observaciones de altura dominante-edad, a partir de la cual se trazaron curvas proporcionales, arriba y debajo de la curva guía, las cuales representan diferentes índices de sitio (Clutter *et al.*, 1983).

Los modelos usados para determinar el índice de sitio en las plantaciones de *S. macrophylla* se generaron de acuerdo con los modelos matemáticos, usando la altura dominante y la edad de las plantaciones. La familia de curvas que se usó para el modelo, que mejor ajustó, fue la familia anamórfica. Lo anterior se debió a que estas curvas se caracterizan por presentar la misma forma, son proporcionales entre sí y la pendiente de la curva a cualquier edad guarda una relación constante entre ellas (Clutter *et al.*, 1983). El punto de inflexión se presentó a la misma edad, ajustando de una forma analítica un modelo matemático para obtener una curva de guía para las observaciones de altura dominante y edad.

Se eligió como edad base 10 años, considerando los estudios de García (1998), Wescom (1979), Mayhew y Newton (1998), Lugo *et al.* (2003), para plantaciones de *S. macrophylla*. La edad base se seleccionó en función de dos criterios: estar cercano a la mitad del turno de corta y estar dentro del rango de edades medidas. Se calcularon los ajustes de las curvas de Von Bertalanffy, Chagoya, Logística, Monomolecular, Weibull, Korf y Wescom, con la base de datos de las plantaciones de *S. macrophylla* en Tabasco (Tabla 1).

Se probaron siete modelos con los crecimientos de las plantaciones, considerando las familias de curvas de índice de sitio propuestas por García (1998) en Quintana Roo, Wescom (1979) en Fiji, Mayhew y Newton (1998) en Sri Lanka y Vallejos (1996) en Colombia, Costa Rica, Honduras, Nicaragua y Panamá, por su similitud climática con Tabasco y las condiciones de cálculo similares a las referidas en este estudio.

Tabla 1. Modelos usados para describir el crecimiento de las plantaciones de *S. macrophylla*.

Modelo	*Ecuación*
Von Bertalanffy	Ad=A0*(1-EXP(-A1*T))**3
Chagoya	Ad=EXP(LOG(A0)-A1*((1/T)-0,1))
Monomolecular	Ad=A0*(1-A1*EXP(-A2*T))
Logístico	Ad=A0/(1+A1*EXP(-A2*T))
Weibull	Ad=A0*(1-EXP(-A1*(T**A2)))
Korf	Ad=A0*EXP(-A1*T**-A2)
Wescom	Ad=A0*(10**(-A1*((1/T-0,1)))

NOTA: Ad = Altura dominante; A0, A1, A2, A3 = parámetros de tasas de crecimiento; EXP = exponencial de la base de los logaritmos naturales; T = tiempo.

Análisis estadístico para determinar el índice de sitio

Se usaron 70% de los datos para el desarrollo de los modelos matemáticos. Con una base de 68 datos se corrieron los modelos de Von Bertalanffy, Chagoya, Monomolecular, Logístico, Weibull, Korf y Wescom, para determinar el índice de sitio. Se utilizaron 30% de los datos para medir la bondad de los ajustes de una forma independiente, a través de los índices para la validación de los modelos (Huang *et al.,* 2003; Domínguez *et al.*, 2006); se estudiaron los errores a través de los parámetros MRES (error medio del modelo) y AMRES (diferencia absoluta media); también se obtuvo la eficiencia de cada modelo y el coeficiente de determinación ajustado.

Procedimiento para la validación de los modelos

$$MRES = \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)}{n}$$

$$MRES(\%) = 100 \cdot MRES / \bar{y}$$

$$AMRES = \frac{\sum |y_i - \hat{y}_i|}{n}$$

$$AMRES(\%) = 100 \cdot AMRES / \bar{y}$$

donde

MRES: error medio del modelo.

AMRES: diferencia media absoluta.

y_i: valor observado o real.

$\hat{y}_i$: valor estimado con el modelo.

n: número de observaciones en la validación de los modelos.

$\bar{y}_i$: valor promedio de los valores observados o reales.

Los modelos se validaron aplicando las fórmulas de eficiencia del modelo (EF) que se considera un estimador para evaluar los modelos aplicados con regresiones no lineales (Huang *et al.,* 2003).

$$EF = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2}$$

donde

y_i : valor observado o real.

$\hat{y}_i$: valor estimado con el modelo.

$\bar{y}_i$: valor promedio de los valores observados o reales.

El coeficiente de determinación ajustado (R^2_{ajust}) no puede ser directamente obtenido en el análisis de varianza de la regresión no lineal, como medida de la bondad del ajuste, por lo que se hace una aproximación de la estimación del coeficiente de determinación ajustado, a través de la diferencia de la suma de cuadrados total y la suma de cuadrados medios de los residuos, para compararlo con la eficiencia del modelo (Domínguez *et al.,* 2006).

$$Aprox - R^2_{ajust} = \frac{SSC - SSR}{SSC}$$

donde

SSC: suma de cuadrado total.
SSR: suma de cuadrados medios de los residuos.

RESULTADOS

Caracterización dasométrica

Se evaluaron ocho plantaciones de *Swietenia macrophylla* King, siete de ellas ubicadas en los municipios de Cunduacán y Huimanguillo, en el área de La Chontalpa y una en el municipio de Centla, en el área de la costa del estado de Tabasco. Las plantaciones evaluadas se encuentran en un intervalo de edad de 7 a 16 años.

Los árboles de esas plantaciones fueron establecidos a diversos espaciamientos, existiendo una diversidad de densidades que va de 156 árb.ha^{-1} a 1111 árb.ha^{-1}, ésta última establecida a una distancia corta de 3 m x 3 m entre los árboles. Solamente dos plantaciones alcanzaron la máxima supervivencia, de 100%, las demás plantaciones presentaron supervivencias entre 40% y 90% (Tabla 2).

La altura dominante como variable indicadora del índice de sitio en las plantaciones de *S. macrophylla* de mayor tamaño fue de 23 m, a una edad de 16 años, y de 8 m a 17 m, en las demás plantaciones a edades que fluctuaban entre 7 y 13 años. Las plantaciones presentaron un área basal máxima de 16 m^2ha^{-1} y la mínima fue de 4 m^2ha^{-1}. El máximo volumen maderable que presentaron las plantaciones fue 185 m^3ha^{-1}, y el mínimo volumen maderable fue de 14 m^3ha^{-1} (Tabla 2).

A continuación se muestra la comparación de medias de Student-Newman-Keuls, de las variables dasométricas en que se realizó esta prueba estadística. Existen plantaciones donde los árboles tienen la misma edad, pero su crecimiento del diámetro a la altura del pecho es diferente, como el caso de tres plantaciones de 9 años que presentaron diámetros de 10 cm, 13 cm y 15 cm. Las dos primeras no difirieron estadísticamente entre sí, pero el diámetro promedio de la tercera fue diferente de las anteriores, aún siendo de la misma edad. La plantación de mayor edad (16 años) presentó

Tabla 2. Valores promedios de las características dasométricas de las plantaciones de *S. macrophylla* en Tabasco.

Clave	*Municipio*	*Edad (años)*	*N (árb.ha^{-1})*	*S (%)*	*Ad (m)*	*AB (m^{2}ha^{-1})*	*V (m^{3}ha^{-1})*
27-036	Cunduacán	7	612	100	12	13	73
27-013	Centla	9	206	40	12	7	14
27-039	Cunduacán	9	556	70	8	8	36
27-041	Cunduacán	9	944	60	15	13	89
27-048	Cunduacán	11	121	60	16	7	54
27-034	Cunduacán	13	156	100	14	4	37
27-053	Huimanguillo	13	800	70	17	13	98
27-037	Cunduacán	16	354	90	23	16	185

NOTA: N = densidad de arbolado; S = supervivencia; Ad = altura dominante; AB = área basal; V = volumen.

un diámetro a la altura del pecho de 23 cm. Se esperaría que la plantación establecida a una densidad menor (625 árb.ha^{-1}) (27-013) presentase un crecimiento mayor a las otras plantaciones con densidad de 1111 árb.ha^{-1}, por disponer éstos de más espacio entre individuos; sin embargo, resultó que esta plantación presentó el menor diámetro promedio de las tres, lo cual puede explicarse ya que las condiciones del sitio desempeñan un papel importante en el crecimiento de los árboles. En estas tres plantaciones se presentó una respuesta similar en el crecimiento de la altura total del árbol. La plantación que mostró el menor crecimiento en diámetro y en altura total, presentó el mayor índice de esbeltez, de 97% (Tabla 3).

La mayoría de las plantaciones presentaron índices de esbeltez menores

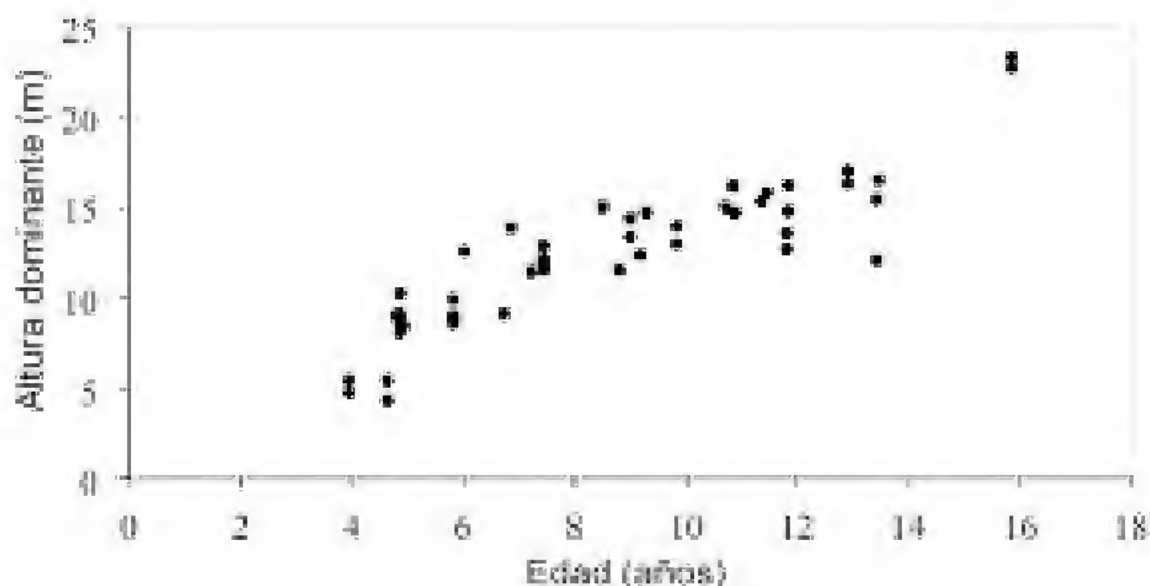


Figura 2. Altura dominante en plantaciones de *S. macrophylla* en Tabasco, México.

Tabla 3. Comparación de medias de las variables dasométricas en plantaciones de *S. macrophylla* en Tabasco.

Clave	*Edad (años)*	*DBH (cm)*	*HT (m)*	*Esbeltez (%)*	*AB (m^2ha^{-1})*	*V ($m^3árb^{-1}$)*
27-036	7	15ed	11d	76b	0,018 d	0,107 ed
27-039	9	13d	9e	77b	0,014 ed	0,072ed
27-013	9	10f	9e	97a	0,011 e	0,065e
27-041	9	15d	13c	90a	0,020 d	0,143d
27-048	11	21b	15b	61c	0,056 a	0,443b
27-034	13	19c	12c	70b	0,033 c	0,236c
27-053	13	14e	13c	97a	0,016 ed	0,121ed
27-037	16	23ª	21a	94a	0,045 b	0,504a

NOTA: DBH = diámetro a la altura del pecho; HT = altura total; AB = área basal; V = volumen maderable; árb = árbol. Media con las mismas letras son estadísticamente iguales con α : 0,05 según la prueba de medias Student-Newman-Keuls

de 80%, las cuales, según González (2001), serían estables; los índices mayores de 81% serían inestables y los mayores de 100% de alta inestabilidad. La esbeltez, en general, refleja el vigor del árbol, ésta varía con la edad: esbeltez de hasta 100% es normal en la fase juvenil de la planta, a partir de los 10 años se espera que la esbeltez sea inferior a 80%; lo contrario es síntoma de árboles muy finos que pueden quebrarse fácilmente.

La máxima área basal de los árboles la presentó la plantación de 11 años de edad, a diferencia de la plantación de 16 años de la zona de La Chontalpa, que presentó menor área basal. En general el volumen de madera por árbol de *S. macrophylla* fue similar en todos los sitios; la mayoría de las plantaciones no presentaron diferencias cuando se practicó el análisis de comparación de medias. La excepción la constituye una plantación de 11 años con densidad de 156 árb.ha^{-1} y otra de 16 años con densidad de 400 árb.ha^{-1}, establecidas en la misma zona de La Chontalpa.

El máximo volumen maderable por árbol lo presentó la plantación 27-037 con 0,504 m^{3}árb.$^{-1}$, con edad de 16 años. La plantación que presentó el mínimo volumen maderable fue la 27-013 con 0,065 m^{3}árb.$^{-1}$, con edad de 9 años. La figura 2 muestra la relación entre la edad de las plantaciones y la altura dominante y provee información acerca de la productividad futura de las plantaciones de la zona de Tabasco. La densidad máxima de árboles obtenida en las plantaciones en desarrollo de *S. macrophylla* fue de 1000 árb.ha^{-1}, pero el volumen maderable en este caso fue de sólo 0,05 m^{3}árb.$^{-1}$, la mínima densidad de las plantaciones fue 104 árb.ha^{-1} con volumen maderable de 0,39 m^{3}árb.$^{-1}$. Las plantaciones que tenían entre 200 árb.ha^{-1} y 400 árb.ha^{-1}, presentaron volumen maderable hasta de 0,5 m^{3}árb.$^{-1}$; en cambio las plantaciones con densidades entre 600 árb.ha^{-1} y 1000 árb.ha^{-1}, sólo alcanzaron 0,03 m^{3}árb.$^{-1}$ (Fig. 3). Se puede ver claramente el efecto de la densidad del arbolado en la producción de volumen maderable medio. Esta misma relación se obtuvo con el área basal y la densidad. El área basal deter-

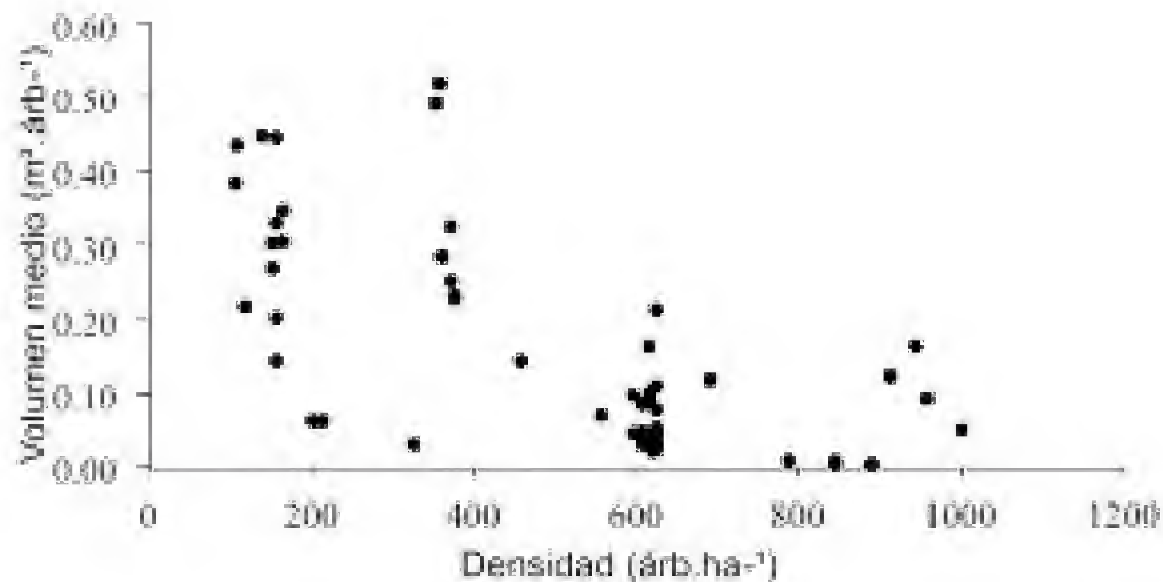


Figura 3. Representación del volumen maderable medio a diferentes densidades de arbolado, en plantaciones de *S. macrophylla* en Tabasco, México.

mina la competencia por espacio, por lo tanto cuando se tiene mayor número de árboles en una hectárea, el área basal por árbol disminuye drásticamente.

El índice máximo de densidad del rodal de Reineke en las plantaciones fue de 505. De acuerdo con Long (1985) una de ellas está en plena ocupación de sitio, cuatro plantaciones están en etapa de crecimiento (Fig. 4) y tres han entrado en etapa de autoaclareo o muerte por selección natural. En las plantaciones que presentaron IDR hasta 176 se encuentran los árboles en crecimiento; IDR mayor de 176 hasta 303 se encuentra en plena ocupacion de sitio, IDR mayor de 303 hasta 505 han entrado a la fase de autoaclareo de los árboles de forma natural, esto debido al exceso de competencia por espacio, luz y nutrimentos.

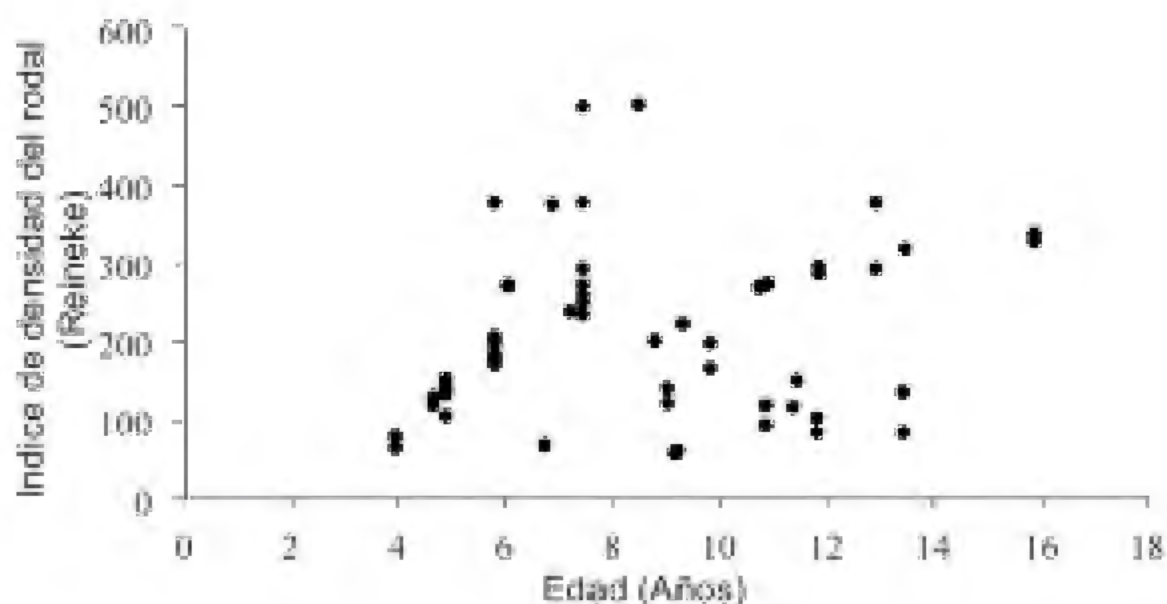


Figura 4. Índice de densidad del rodal de Reineke en plantaciones de *S. macrophylla,* de acuerdo con Long (1985).

Índice de sitio

De los siete modelos probados (Bertalanffy, Chagoya, Logístico, Monomolecular, Weibull, Korf y Wescom) para determinar el índice de sitio en las plantaciones de *S. macrophylla*, el análisis de regresión no lineal aplicado demostró que el modelo de Korf es estadísticamente diferente, como se muestra en la tabla 4. A continuación se presentan los resultados de los valores del coeficiente de determinación ajustado y la eficiencia de los modelos que determinó la selección del modelo (Tabla 5). De los siete modelos, el que mejor eficiencia presentó fue el de Korf, así como el mejor coeficiente de determinación ajustado (0,80 en ambos casos). Los modelos de Von Bertalanffy y Chagoya resultaron muy bajos y negativos en la eficiencia, por el bajo ajuste de esos modelos. De los siete modelos probados para construir la curva de índice de sitio, la curva guía con el modelo de Korf fue la que mejor ajuste presentó y mayor eficiencia del modelo para las plantaciones estudiadas, siendo 12,34 m la altura dominante a una edad base de 10 años. El modelo de Korf quedó como sigue:

$$Ad = 12{,}34 \cdot e^{-4{,}9(t)^{-0{,}29}}$$

donde

Ad: la altura dominante.
e: la base de los logaritmos naturales.
t: tiempo.

Posteriormente, con la curva guía del modelo de Korf seleccionado, se determinaron tres índices de sitio, con tres curvas de calidad, las cuales se clasificaron como baja, media y alta. El índice de sitio de las plantaciones que presentaron una productividad alta fue de 17,5 m; las plantaciones que presentaron una productividad media tuvieron un índice de sitio de 14,5 m y las que presentaron una productividad baja 11,5 m (Fig. 5).

Tabla 4. Resultados de análisis de regresión no lineal y parámetros estimados para el modelo de altura dominante de Korf en *S. macrophylla*.

Fuente	*G.L*	*Suma de cuadrados*	*Cuadrados medios*
Regresión	3	4954,8	1651,6
Residual	25	109	4,3588
Total no corridos	28	5063,8	
Total corridos	27	560,4	

Variable	*Estimación*	*Intervalo de confianza al 95%*	
		Inferior	*Superior*
Término independiente	21426,4	0,934	60,060
*A*0	180,1	-43948	44308
*A*1	4,9	-118,8	128
*A*2	0,291	-1,6326	2,2146

Tabla 5. Eficiencia y R^2 ajustada de los modelos de altura dominante en *S. macrophylla*.

Modelos	*R² ajustada*	*Eficiencia (EF)*
Von Bertalanffy	0,7655	-5,08
Chagoya	0,7890	-2,33
Monomolecular	0,7749	0,77
Logístico	0,7962	0,79
Weibull	0,7731	0,76
Korf	0,8015	0,80
Wescom	0,7890	0,79

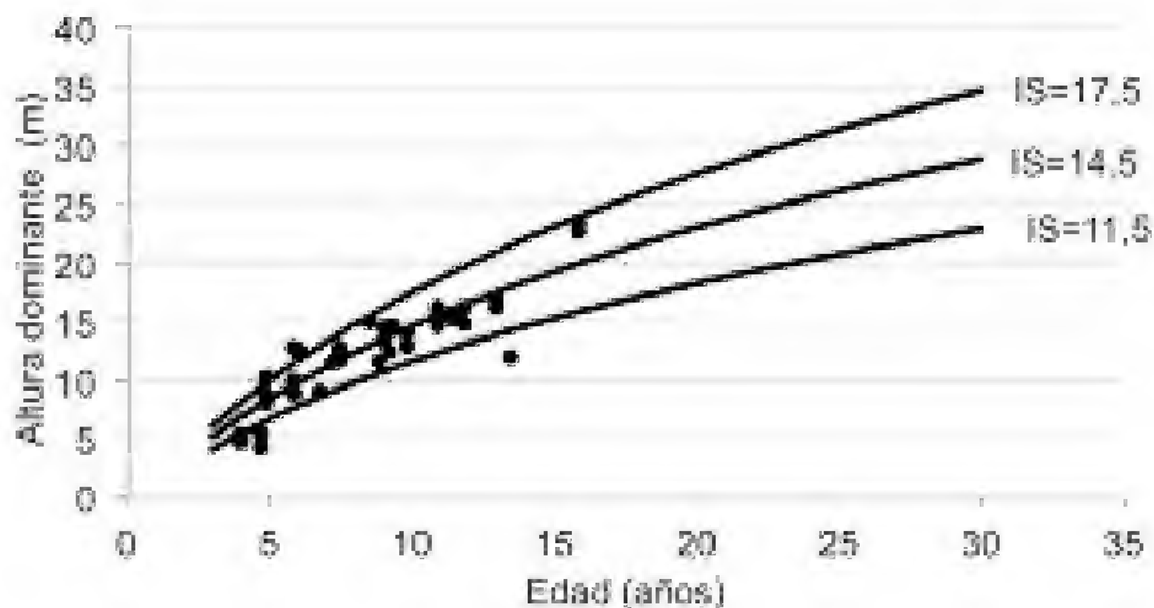


Figura 5. Calidades de sitio para plantaciones de *S. macrophylla* en Tabasco, México.

DISCUSIÓN

El análisis estadístico de los datos de las plantaciones de *Swietenia macrophylla* King, permitió caracterizar el crecimiento de la especie, observándose que existe poca variabilidad en diámetro a la altura del pecho, altura total, edad, área basal y volumen. Las plantaciones forestales tropicales están altamente influidas por la densidad y son afectadas en el crecimiento, principalmente, debido a que los árboles requieren mucho espacio e iluminación, sobre todo tratándose de especies perennes (Dawkins, 1961). El factor densidad fue relevante para la productividad de las plantaciones en estudio; en aquellas plantaciones que presentaron más de 1000 árb.ha^{-1} el volumen maderable fue de 0,05 m³árb.$^{-1}$, mientras que en la plantación con densidad de 104 árb.ha^{-1} el volumen fue de 0,39 m³árb.$^{-1}$. Lo anterior indica que la densidad es un factor que afecta drásticamente el volumen o

producto final, como se ha demostrado en estudios en Puerto Rico, Martinica, Filipinas, México, Indonesia y Sri Lanka, esta última con espaciamientos de 2m x 2m y 3m x 3m (Mayhew y Newton, 1998).

Otros factores que afectan a las plantaciones son las diferencias en las condiciones de sitio, éstos podrían alterar la pendiente de la línea de máxima densidad en la gráfica de poblaciones monoespecíficas (Lonsdale y Watkinson, 1983), además de los factores físicos como el viento y las plagas forestales que ocasionan daño mecánico o fisiológico al árbol que disminuye la densidad (Conafor, 2005). La densidad es un factor que influye fuertemente en el crecimiento de las plantaciones de *S. macrophylla*, al cual se debe prestar atención en los primeros 5 años de establecimiento de una plantación (Mayhew y Newton, 1998).

El área basal determinada en las plantaciones de *S. macrophylla* fue de 16,4 m^2ha^{-1} como máximo y 4 m^2ha^{-1} como mínimo; la mayor área basal detectada a la edad de 7 años fue 13 m^2ha^{-1}. Este último resultado supera el de otro estudio con el mismo manejo silvicola, en la misma especie y edad, en que el área basal fue de 10 m^2ha^{-1} (Bauer, 1987). En el caso de plantaciones en Honduras (AFE-COHDEFOR, 1989), se ha determinado que plantaciones con área basal de más de 25 m^2ha^{-1} requieren un tratamiento de aclareo con intensidad de 35%, de 21 m^2ha^{-1} a 24,9 m^2ha^{-1} la intensidad sugerida es de 30%, buscando disminuirla hasta los 16 m^2ha^{-1}. Las plantaciones en Tabasco están en el rango sugerido por la AFE-COHDEFOR (1989); las cuales con un buen manejo podrían presentar mayor potencial de producción.

El índice de rodal de Reineke expresa el número de árboles por hectárea con un diámetro de 25 cm; al aplicar este índice se determinó que las plantaciones de *S. macrophylla* presentaron un IDR 505. De acuerdo con la interpretación de Long (1985), se determinó que tres plantaciones han entrado en autoaclareo porque tienen más de 60% de IDR, una plantación está en etapa de máxima ocupación del sitio con más de 35% de IDR y cuatro plantaciones presentan árboles en crecimiento. Los límites de 35% a 60% del IDR definen el intervalo de densidad dentro del cual la productividad es máxima (Langsaeter, 1941). Este índice se ha determinado en otras especies como *Cedrela odorata,* con 588 de IDR como valor máximo y en *Tectona grandis,* con 1100 como máximo IDR, con árboles en plena ocupacion de sitio que ya requieren aclareos (Jerez *et al.,* 2003; Murillo, 2008).

En cuanto al diámetro de los árboles en las plantaciones de *S. macrophylla* en Tabasco, se vio afectado por la densidad y el sitio; sin embargo, los resultados de este estudio concuerdan con los de otros realizados en Filipinas, donde se ha demostrado que la especie llega a alcanzar 1,8 m de altura en el primer año y de 15 cm a 20 cm de diámetro en 14 años. En Iquitos, Perú, alcanza los 27 cm de diámetro y de 20 m a 25 m de altura en 12 años (Conabio, 2001), bajo manejo silvícola. Sin embargo, el diámetro de cualquier especie es altamente sensible a los cambios con la densidad (Gadow *et al.,* 2007). En general, el diámetro crecerá con base en el manejo que se aplique a dicha especie y la productividad del sitio, además de considerar otros factores como la densidad de plantación, el tamaño de la copa, la presencia de enfermedades, la aplicación de fertilizante, las características genéticas, entre otros.

De las ocho plantaciones estudiadas, 50% presentó índices de esbeltez entre 90% y 97%, otro 50% presentó índices entre 61% y 77%. El índice de esbeltez es la relación entre la altura y el

diámetro normal; es un valor que ha sido utilizado como un indicador de la estabilidad de los árboles contra daños ocasionados por fuerzas mecánicas; valores bajos de esbeltez están asociados con árboles más cónicos que pueden ser más resistentes al efecto de fuertes vientos (Arias, 2004). Entre más alto sea el valor de esbeltez, menos estable es el árbol ante los daños mecánicos (Durlo y Denardi, 1998).

La supervivencia de los árboles fue superior a 60% en siete de las plantaciones estudiadas con un espaciamiento de 3 m x 3 m hasta 8 m x 8 m y en la plantación restante fue de 40%. Estudios anteriores en plantaciones de *Cedrela odorata* en Tabasco indican 71% a 97% de supervivencia (Murillo, 2008). Haggar *et al.* (2000), mencionan que 60% de supervivencia es considerado un porcentaje alto. La supervivencia puede ser afectada en gran medida por los espaciamientos en las especies tropicales (Evans y Turnbull, 2004), además, por ser un árbol perennifolio es más vunerable a la sequía y su lento crecimiento hace que esté expuesto a condiciones ambientales desfavorables (Barchuk y Díaz, 1999). Cabe señalar que, de acuerdo con la Comisión Nacional Forestal (Conafor, 2008), para que una plantación sea sujeto de apoyo debe cumplir con 70% a 80% de supervivencia a un año de edad. La supervivencia de la especie está más relacionada con las condiciones del sitio, con la cantidad de luz, agua y nutrimentos del suelo.

El volumen maderable es el producto final de toda plantación de *S. macrophylla* con fines comerciales. Resultados de Xue y Hagihara (2008), señalan que el efecto de la densidad sobre el crecimiento se ve reflejado en la altura, debido a que ésta se ve disminuida en su crecimiento con el aumento de la densidad y, por lo tanto, se ve afectado el volumen. Esto se debe principalmente a la competencia por espacio, luz, agua, nutrimentos y a características genéticas de la especie, plagas y enfermedades, huracanes, tipo de suelo, entre otros. El volumen maderable en las plantaciones de 7 años fue de 13 m^3ha^{-1} y en plantaciones de 16 años de edad de 185 m^3ha^{-1}. En otros estudios con esta misma especie, con manejo silvícola en Quintana Roo, reportaron volumen de madera de 22,8 m^3ha^{-1} a edad de 5 años y 50,3 m^3ha^{-1} a 15 años (García *et al.*, 2007) y en la misma localidad García *et al.* (2011) predicen, mediante una modelización del crecimiento, un volumen de madera de 32 m^3ha^{-1} a edad de 5 años y 140 m^3ha^{-1} a 15 años. En Indonesia se obtienen crecimientos de 18 $m^3ha^{-1}año^{-1}$ a la edad de 20 años, en la Isla de Fiji 5 $m^3ha^{-1}año^{-1}$ a edad de 35 años, en la Isla de Martinica 14 $m^3ha^{-1}año^{-1}$ a 25 m^3ha^{-1} a edad de 35 años, en la Isla de Guadalupe 17 $m^3ha^{-1}año^{-1}$ a edad de 25 años y en Belice alcanza un crecimiento de 6 $m^3ha^{-1}año^{-1}$ totalizando un volumen de 280 m^3ha^{-1} a edad de 50 años (Mayhew y Newton, 1998).

La determinación del índice de sitio en plantaciones de *S. macrophylla* a las cuales no se les ha dado manejo silvícola de aclareo, poda y fertilización, fueron clasificados en tres tipos: como bajo (11,5 m), medio (14,5 m) y alto (17,5 m) con una edad base de 10 años. García (1998) y García *et al.* (1998) determinaron cinco índices de sitio (12, 14, 16, 18 y 20 m) a una edad base de 30 años en plantaciones de *S. macrophylla* en Quintana Roo, con los modelos de Chapman y Richards y Weibull, los cuales sobreestiman las edades, sin embargo, esto es posible debido a los hábitos de crecimiento y edades de las plantaciones, además la consideran como una especie de lento crecimiento. En una buena calidad de sitio los turnos son más cortos que en los sitios de mediana y baja

calidad (Assmann, 1961; Aguirre y Zepeda, 1984; Madrigal y Ramírez, 1995; Rodríguez, 1996). Wescom (1979) determinó seis índices de sitio con edad base de 10 años en *S. macrophylla* en Isla de Fiji; los índices de sitio que encontró fueron (10, 13, 16, 19, 22 y 25 m) y Rodríguez (1996) en Chetumal, Quintana Roo, determinó cuatro índices de sitio (14, 16, 20 y 22 m) en plantaciones de esta especie sin manejo silvícola a una edad base de 30 años.

En las plantaciones estudiadas los modelos con mejores ajustes fueron Bertalanffy, Chagoya, Logística, Monomolecular, Weibull, Korf y Wescom. El modelo de Weibull presentó un coeficiente de determinación de 0,77. Éste último es menor, comparado con otro estudio en plantaciones de Quintana Roo donde se encontró un R^2 0,99 (García *et al.,* 2007). El modelo Weibull es el más usado en las plantaciones de *S. macrophylla*, sin embargo, aquí el modelo fue menos eficiente; otros modelos usados para esta especie han sido Wescom en la Isla de Fiji, Schumacher en Quintana Roo y Chagoya en Costa Rica (Rodríguez, 1996; García *et al.,* 1998).

CONCLUSIÓN

Este estudio permitió comprender el crecimiento de las plantaciones de *Swietenia macrophylla* King, en el estado de Tabasco. La caracterización dasométrica reveló que las plantaciones en desarrollo de *S. macrophylla* en Tabasco se encuentran en densidades de 100 árb.ha^{-1} a 1000 árb.ha^{-1} con edad de 4 a 16 años, con área basal entre 4 m^{2}ha^{-1} y 16 m^{2}ha^{-1}, con volúmenes que van desde los 14 m^{3}ha^{-1} hasta los 185 m^{3}ha^{-1}. De acuerdo con el índice de densidad de rodal de Reineke, de las ocho plantaciones, cuatro están en estado de crecimiento, una en plena ocupación del sitio que necesita manejo silvícola de aclareo y tres de ellas han entrado en autoaclareo, habiendo entrado los árboles en competencia y por tanto rebasado el momento de la aplicación de aclareo.

Para la determinación del índice de sitio los modelos de Wescom, Weibull, Logístico y Monomolecular presentaron buenos ajustes y eficiencias, sin embargo el modelo de Korf fue el mejor. Se definieron tres curvas de índice de sitio, determinando 11,5 m para el índice de sitio bajo, 14,5 m para índice de sitio medio y 17,5 m para el índice de sitio alto, todos ellos a edad base de 10 años. Las aportaciones de este trabajo en cuanto a la caracterización dasométrica y determinación de índice de sitio, servirán para proyectar la producción esperada y el manejo silvícola a aplicar en las plantaciones de *S. macrophylla* en Tabasco, aportando conocimiento de las zonas con mayor potencial productivo para el establecimiento de esta especie en la zona tropical de México.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue realizada con el apoyo financiero de la Fundación Produce, Tabasco, del proyecto “Diagnóstico del estado silvícola y desarrollo de un plan de aclareos en plantaciones de cedro y caoba en Tabasco”.

REFERENCIAS

AFE-COHDEFOR. 1989. El sector forestal hondureño. Proyecto HON/ 88/003FAO/PNUD. Departamento de Planificación. Tegucigalpa, Honduras. 25 p.

Aguirre C., O.A. y E.M. Zepeda B. 1984. Estimación de índice de sitio para *Pinus pseudostrobus* Lindl., en la

región de Iturbe, Nuevo León. Tesis profesional. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. Chapingo, México. 71 p.

Arias, D. 2004. Estudio de las relaciones altura-diámetro para seis especies maderables utilizadas en programas de reforestación en la Zona Sur de Costa Rica. Revista Forestal Kurú 1(2):1-11.

Assmann, E. 1961. Waldertragskunde. Munich, Alemania, Bayerischer Landwirtschaftsverlag. 490 p.

Assmann, E. 1970. The principles of forest yield study. 1a. ed. Pergamon Press. Oxford. 506 p.

Avery, E.T. y E.H. Burkhart. 2002. Forest measurements. Fifth ed. McGraw-Hill. Nueva York, EUA. 456 p.

Barchuk, A.H. y M.P. Díaz. 1999. Regeneration and structure of *Aspidosperma quebracho-blanco* Schl. in the Arid Chaco (Córdoba, Argentina). Forest Ecology and Management 118:31-36.

Bauer, G.P. 1987. *Swietenia macrophylla* King and *S. macrophylla* x. *S. mahogany* development and growth: the nursery phase and the establishment phase in linne planting in the Caribbean National Forest, Puerto Rico. Tesis de Maestría, College of Environmental Science and forestry, Faculty of Forestry, State University of New York. EUA. 310 p.

Bravo M., A. 2007. Estimación maderable y evaluación financiera de plantaciones forestales comerciales de cedro y caoba en Oaxaca, México. Tesis de Maestría. Montecillo, Texcoco, Edo. de México. 86 p.

Challenger, A. 1998. Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México: pasado, presente y futuro. Conabio, Instituto de Ecología, UNAM y Agrupación Sierra Madre S.C., México. s/p.

Clutter, J.L., J. Forston, L. Pienaar, G. Brister y R. Bailey. 1983. Timber management: a quantitative approach.Wiley. Nueva York, EUA. 333 p.

Codina C., J. 2003. El índice de Hartbecking y su justa medida. Foresta 24:50-52.

CONABIO (Comisión Nacional de la Biodiversidad). 2001. Árboles y arbustos nativos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación. Instituto de Ecología. Universidad Nacional Autónoma de México. México D. F. 236 p.

CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2005. Informe de la situación del medio ambiente en México. Disponible en línea: http://148.223.105.188: 2222/gif/snif_portal/option=com_content-task=viewid=50&Itemid=64/index.php. Consultada el 16 de julio de 2009.

CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2008. Programa Forestal de la Comisión Estatal Forestal de Tabasco. Disponible en línea: www.conafor.gob.mx. Consultada el 23 de septiembre de 2009.

Daniel, T.W., J.A. Helms y F.S. Baker. 1982. Principios de silvicultura. (Trad. Ramón Elizondo Mata). McGraw-Hill. México D.F. 491 p.

Dawkins, H.C. 1961. Estimating total volumes of some Caribbean trees. Caribbean Forester 22(3-4):62-63.

Domínguez D., M., F. Bravo O. y M. Del Río G. 2006. Modelo de tamaño de copa en *Pinus sylvestis* L., en bosques del centro de España. Interciencia 31(3):168-175.

Durlo, D.M. y L. Denardi. 1998. Morfometría de Cabralea canjerana, em mata Secundaria nativa do Rió Grande do Sul. Revista Ciência Florestal 1(8):55-66.

Evans, J. y J.W. Turnbull. 2004. Plantation Forestry in the Tropics: The Role, Silviculture, and Use of Planted Forests for Industrial, Social, Environmental, and Agroforestry Purposes. 3a. ed. Oxford University Press, Nueva York. 467 p.

Gadow, K.V., S. Sánchez O. y J. G. Álvarez G. 2007. Estructura y crecimiento del bosque. IUFRO World Series. 242 p.

García C., X. 1998. Predicción del rendimiento de *Swietenia macrophylla* King (caoba) en plantaciones forestales. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.114 p.

García C., X., H. Ramírez M., C. Rodríguez F., J. Jasso M. y C.A. Ortiz S. 1998. Índice de sitio para caoba (*Swietenia macrophylla* King) en Quintana Roo, México. Ciencia Forestal en México. 23(84):9-18.

García C., X., J. Flores G., y J. D. Benavides S. 2007. Índice de sitio para *Cedrela odorata* L. (Cedro rojo) en Quintana Roo, México. Ciencia Forestal en México 32(101):71-92.

García C., X., B. Rodríguez S. y J. Islas G. 2011. Evaluación financiera de plantaciones forestales de caoba en Quintana Roo. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 2 (7):7-26.

García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. México. Universidad Autónoma de México, Instituto de Geografía. México D.F. 252 p.

González M., J.M 2001. Introducción a la silvicultura general. Universidad de León. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria. España. 271 p.

Haggar, J., K. Wightman, L. Sosa, K.H. Van, J.A. Contreras y G. Hernández. 2000. Una estrategia para hacer rentable la producción de árboles por ejidatarios en la península de Yucatán. II Foro Internacional. Los aprovechamientos forestales y su relación con el ambiente. Veracruz, México. s/p.

Huang, S., Y. Yang y Y. Wang. 2003. A critical look at procedures for validating growth and yield models. En: Amaro, A., Redd, D., Soares, P. (Eds.) Modelling Forest Systems. CABI. p: 271-293.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2000. Marco Geoestadístico. Disponible en línea: http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/ datosgeogra/ basicos/ estados/ tab_geo.cfm. Consultada el 20 de agosto de 2009.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2005. Cuaderno estadístico municipal de Jalapa, Tabasco. Impreso en México. 207 p.

Jerez, J., L. Vicent, Y. Moret y R. González. 2003. Regímenes de espaciamiento inicial y aclareo en plantaciones de Teca (*Tectona grandis*) L.F. en Venezuela. 16 p. Disponible en línea: http://www.una.ac.cr/inis/docs/teca/temas/ RegmenesdEspaciamiento1.pdf. Consultada el 06 de agosto del 2009.

Klepac, D. 1983. Crecimiento e incremento de árboles y masas forestales. 2a. ed. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 365 p.

Langsaeter, A. 1941. Om tynning i enaldret gran-og furuskog (About thinning in even-aged stands of spruce, fir and pine), Meddel. F.D. Norske Skogforsoksvesen 8:131-216.

Long, J.N. 1985. A practical approach to density management. Forestry Chronicle 61:23-27.

Lonsdale, W.M. y A.R. Watkinson. 1983. Plant geometry and sel-fthinning. Journal of Ecology 71:285-297.

Lugo, A.E., J.C. Figueroa-Colón y M. Alayón. 2003. Big-Leaf Mahogany: Genetic, Ecology, and Management. Springer Verlag. Nueva York. 433 p.

Madrigal H., S. y H. Ramírez M. 1995. Comparación de nueve modelos empíricos para la determinación del índice de sitio en Michoacán. Ciencia Forestal en México 20(78):35-57.

Mayhew, J.E. y A.C. Newton. 1998. The silviculture of mahogany (*Swietenia macropylla*). 1a. ed. CABI Publications. Wallingford, Reino Unido. 226 p.

Murillo B., Y. 2008. Determinación de aclareo en plantaciones de Cedro (*Cedrela odorata* L.) en el estado de Tabasco. Tesis de Maestría, Campus Tabasco, H. Cárdenas, Tabasco. 88 p.

Palma-López, D.J., E. Moreno C., J.A. Rincón-Ramírez y E. D. Shirma T. 2008. Degradación y conservación de los suelos del estado de Tabasco. Colegio de Postgraduados, Conacyt, CCYTET. Villahermosa, Tabasco, México. 74 p.

Ramírez M., H. y M. Zepeda B. 1994. Rendimientos maderables de especies forestales, actualidades en México. En: Memorias de la IV Reunión Nacional de Plantaciones Forestales. SFFS-INIFAP. México, D.F. p: 15-21.

Reineke, L.H. 1933. Perfecting a stand density index for even aged forests. Journal agricultural Research 46 (7):627-637.

Rodríguez S., B. 1996. Estimación del crecimiento y relaciones dasométricas de caoba (*Swietenia macrophylla* King.) en plantaciones forestales. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.

Smith, D.M., B.C. Larson, M.J. Kelty y P.M. Ashton. 1997. The practice of silviculture: applied forest ecology. 9a. ed. John Wiley and Sons. Nueva York. 537 p.

Vallejos B., O. 1996. Productividad y relaciones de índice de sitio con variables fisiográficas, edafoclimáticas y foliares para *Tectona grandis* L., *Bombacopsis quinatum* (Jacq) Dugand y *Gmelina arborea* Roxb en Costa Rica. Turrialba, CR, CATIE. 147 p.

Wescom, R.W. 1979. Silvicultural Research Division Annual Report 1978. Department of Forestry, Fiji. s/p.

Xue, L. y A. Hagihara. 2008. Growth analysis of the competition-density effect in non-self-thinning *Populus deltoides* and *Populus* and *Populus x euramericana* plantations. Journal of Forest Research 13(4):241-248.

Artículo recibido el 27 de noviembre de 2009.
Aceptado el 17 de febrero de 2012.

Este artículo se debe citar como: Pérez-González, G., M. Domínguez-Domínguez, P. Martínez-Zurimendi y J.D. Etchevers-Barra. 2012. Caracterización dasométrica e índice de sitio en plantaciones de caoba en Tabasco, México. *Madera y Bosques* 18(1):7-24.

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Modelos de biomasa aérea y foliar en una plantación de pino de rápido crecimiento en Oaxaca

Above-ground and needle biomass models on a fast-growing pine plantation in Oaxaca

Gerardo Rodríguez-Ortiz[1,2], Héctor M. De Los Santos-Posadas[1*], Víctor A. González-Hernández[1], Arnulfo Aldrete[1], Armando Gómez-Guerrero[1] y Aurelio M. Fierros-González[1]

RESUMEN

El vigor de un árbol se puede evaluar a partir del follaje, que si bien representa de 4% a 6% de la biomasa total del árbol, es el componente principal para los procesos fisiológicos. El objetivo de este estudio fue estimar la biomasa de acículas en ramas individuales y árbol completo, y ajustar modelos de partición de biomasa aérea en árboles plantados de *Pinus patula* Schl. et Cham. La biomasa de acículas por rama se estimó con un modelo lineal, que empleó área basal de rama viva, altura de rama y el seccionamiento de copa como variables independientes. La biomasa de los componentes aéreos se estimó con coeficientes de determinación de 0,86; 0,92 y 0,88; para madera con corteza, ramas y acículas, respectivamente. Para madera con corteza se utilizó el diámetro normal (DN) y altura de árbol (AT) en un modelo lineal; la biomasa de ramas y follaje con ecuaciones no lineales que se basaron en el diámetro de copa viva (DCV) y área de copa para ramas; y DCV y AT para la biomasa de follaje. La biomasa total aérea por árbol se estimó con un R^2 = 0,87; utilizando DN y AT. La biomasa a una edad de 14 años se distribuyó en 92,9%; 4,7% y 2,4% para madera, ramas y follaje, respectivamente.

PALABRAS CLAVE:
Diámetro basal de rama viva, diámetro de copa viva, *Pinus patula,* sección de copa.

ABSTRACT

A forest tree health can be accurately assessed by evaluating foliage biomass; even when it represents only 4% to 6% of the total tree biomass, it is the main driver of every major physiological processes. This research was mainly focused on estimating accurately needle biomass at branch and tree level on fast growing trees of *Pinus patula* Schl. et Cham. Needle biomass per branch was estimated with a linear model, which used live branch basal area, live branch height, and crown section like independent variables. Above ground components were estimated with determination coefficients of 0,86, 0,92 and 0,88 for wood with bark, branches and needles. For the wood with bark model, diameter at breast height (DBH) and total tree height (HT) were used in a linear structure; total branch biomass was fitted with a non-linear model, using live crown diameter (LCD) and crown area (CA) while total needle biomass used LCD and HT on a non-linear model. The aboveground total biomass per tree was estimated with R^2 = 0.87, using DBH and HT. At 14 years old, biomass partition was estimated to be 92,9%, 4,7% and

1 Colegio de Postgraduados, Carretera México-Texcoco, km. 36.5, CP 56230, Montecillo, Texcoco, Edo. México.
2 Dirección actual. División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca, Ex-Hacienda de Nazareno, Oaxaca, CP 71230.
* Autor para correspondencia, c.e.: hmsantos@colpos.mx

2,4% for wood with bark, branches and needles, respectively.

KEY WORDS:
Basal live branch diameter, live crown diameter, *Pinus patula*, crown section.

INTRODUCCIÓN

Ante el cambio climático global las plantaciones forestales de rápido crecimiento adquieren mayor importancia como reservorios de carbono. Por ello, el estimar confiablemente la biomasa (cantidad total de materia orgánica presente) es vital para una determinación adecuada del potencial de secuestro de carbono (Garzuglia y Saket, 2003; Návar *et al.*, 2002). Con frecuencia, tales estimaciones involucran una importante fuente de incertidumbre en los modelos de flujo de carbono (Houghton *et al.*, 2000), sobre todo cuando se utilizan relaciones alométricas poco apropiadas. La distribución de biomasa aérea de los árboles en sus diferentes órganos está influenciada por las condiciones ambientales y de manejo silvícola. Por ejemplo, en *Pinus patula* se han encontrado incrementos en el crecimiento diametral y en la biomasa global cuando el árbol crece asociado con especies fijadoras de nitrógeno (Gutiérrez-Guzmán *et al.*, 2004).

A pesar que la biomasa foliar sólo representa de 4% a 6% de la biomasa total del árbol, es uno de los componentes más importantes en la productividad de un rodal, porque es donde ocurren muchos procesos fisiológicos fundamentales para el crecimiento, como intercepción de luz, fotosíntesis neta, transpiración, respiración, eliminación de CO_2 (Gower y Norman, 1991; Margolis *et al.*, 1995), y es donde se genera la productividad primaria neta (Gholz y Cropper, 1991). Puesto que el follaje presenta estacionalidad con los patrones climáticos y es muy sensible al manejo silvícola, la biomasa foliar debe ser estimada con precisión para explicar la productividad de un rodal. Ello indica que los modelos futuros de crecimiento y rendimiento del rodal deben incluir a este componente, porque involucrarían ecuaciones más específicas para un determinado sitio. En consecuencia, los modelos generados para estimar el follaje deberán ser también sensibles a los factores del ambiente y de manejo, así como superar la inherente dificultad para medir este componente con precisión, pues a medida que el tamaño de los árboles se incrementa, su evaluación consume más tiempo y recursos.

Pinus patula Schl. et Cham. es una pinácea endémica de México y de las más explotadas en el país (Sánchez-González, 2008). Proporciona un alto potencial productivo mediante manejo silvícola simple y posee una amplia variedad fenotípica y genética en la calidad de la madera (Barnes *et al.*, 1994; Dvorak *et al.*, 2000). Sus productos se aprovechan en una amplia gama de usos, por ello fue una de las primeras especies de pinos mexicanos en ser plantadas y mejoradas genéticamente en Sudáfrica (Perry, 1991), y sus áreas de plantación se extendieron a otros países (Dvorak *et al.*, 2000; Valencia y Vargas, 2001). Ixtlán de Juárez es una comunidad pionera del estado de Oaxaca en trabajos serios de plantaciones forestales de rápido crecimiento con *P. patula* y otras especies. En las plantaciones se ha utilizado germoplasma de árboles selectos de sus rodales naturales. El establecimiento de diversos ensayos inició en 1995 en una superficie de 5 ha en donde se utilizaron áreas fraccionadas de terrenos que anteriormente estaban ocupados con cultivos agrícolas. Desde 2004, se establecieron parcelas con aclareos aplicados bianualmente en *P. patula*, en las que se ha reportado un incremento corriente anual, antes y después de las intervenciones de 14,9 $m^3ha^{-1}año^{-1}$ y 36,3 $m^3ha^{-1}año^{-1}$, respectivamente. Con esta tasa de crecimiento la comunidad de Ixtlán se

encuentra motivada para extender la superficie plantada con árboles de rápido crecimiento (Servicios Técnicos Forestales Ixtlán de Juárez, 2008).

OBJETIVO

Encontrar modelos matemáticos que permitan estimar con suficiente precisión la biomasa de acículas en ramas individuales y en el árbol completo, así como modelos que estimen la partición de biomasa aérea en árboles plantados de *Pinus patula* Schl. et Cham. en Ixtlán, Oaxaca, de manera que los modelos puedan ser aplicados a datos de inventario en la plantación.

METODOLOGÍA

El área de estudio

La plantación de 5 ha de *P. patula* se estableció en 1995 en la comunidad de Ixtlán de Juárez, Oaxaca. Se localiza en terrenos planos y con pendientes de 20% a 40%, a una altitud promedio de 2550 m, a 17° 22´ 38,69" LN y 096° 28´ 44,8" LO. Las plántulas se obtuvieron de semilla de árboles selectos de la misma comunidad y se establecieron en suelos preparados con maquinaria pesada. El estudio se efectuó en seis parcelas de 20 m x 20 m, delimitadas en 2004; en cinco de ellas se aplicaron aclareos y en la otra no se hicieron (testigo). Los aclareos se aplicaron en intervalos de dos años. En 2008 se hicieron mediciones de diámetro normal (DN, cm), diámetro al pie (DP, cm), diámetro de copa en dos ejes (N-S, E-O, m) y altura total (AT, m) y se calculó área de copa (AC, m^2), área basal (AB, m^2ha^{-1}), volumen total (VT, m^3) y volumen extraído en cada corta (Tabla 1). El VT se determinó mediante el modelo que se utiliza para esta especie:

$$VT = 0,076528 \times DN^{1,672251} \times AT^{1,333502}$$

(TIASA, 1993), con DN y AT en metros.

Tabla 1. Características de las parcelas de estudio y aclareos aplicados a *P. patula* en la plantación de Ixtlán, Oaxaca.

Característica	*Parcelas (400 m²)*					
	1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*
Tratamiento	*Aclareo*	*Aclareo*	*Aclareo*	*Aclareo*	*Aclareo*	*Testigo*
Pendiente (%)	5	0	40	35	30	5
Plantas ha^{-1} (2004)	3600	3650	5675	5000	4525	4650
Plantas ha^{-1} (2008)	1250	2200	1775	1800	1900	3625
Diámetro normal 2004 (cm)	10,4	9,7	8,6	9,2	10,0	8,5
Diámetro normal 2008 (cm)	20,7	16,2	17,6	17,4	16,8	12,6
Altura de planta 2004 (m)	7,6	7,8	7,1	7,4	7,9	7,1
Altura de planta 2008 (m)	15,7	12,9	14,8	14,9	14,9	12,2
Área basal 2004 (m^2 ha^{-1})	38,28	30,25	38,55	38,57	40,58	31,28
Área basal 2008 (m^2 ha^{-1})	43,25	47,87	44,25	43,85	43,19	50,17
Volumen extraído 2004 (%)	15,11	10,90	35,03	21,47	0	0
Volumen extraído 2006 (%)	3,74	0	0,93	0	0,72	0
Volumen extraído 2008 (%)	6,01	7,09	5,89	5,65	27,37	0
Volumen total removido (%)	24,86	17,99	41,85	27,12	28,09	0

Muestreo de madera con corteza

Con los datos de DN y AT se obtuvieron las estructuras diamétricas de cada parcela y la caracterización del tipo de dominancia de la copa. Se seleccionaron, en forma aleatoria, 30 árboles para derribo (cinco por parcela), todos ellos sanos y no bifurcados, distribuidos en las categorías diamétricas, constituidos por tres árboles suprimidos, siete intermedios, 15 codominantes y cinco dominantes. Cada árbol se identificó con su número de parcela, etiqueta de campo y número de derribo. El derribo se realizó en 2009 con motosierra a una altura de 30 cm. En cada árbol derribado se midió diámetro (cm) en el tocón (DT), DN y en la altura del inicio de copa viva (DCV); altura de tocón (HT), AT, longitud de fuste limpio (LFL) y longitud de copa viva (LCV), todas en metros. Después de la separación de ramas del fuste principal, se cortaron trozas de 1 m de longitud, del tocón a la punta; cada troza se pesó en verde (PV en kg) con una báscula electrónica Tororey®, serie EQB/EQM, con capacidad de 100 kg, y se midió el diámetro inferior y superior de las mismas. En la primera troza se obtuvieron dos rodajas (inferior y superior) de 5 cm de espesor; en el resto de las trozas sólo la superior. Todas las trozas fueron identificadas por números progresivos y embolsadas, por cada árbol. En el punto de medición de DT, DN y DCV, así como en la parte media del fuste limpio, se obtuvieron rodajas de 5 cm de espesor. En cada rodaja se determinó el PV (g) en campo y el volumen verde por desplazamiento de agua (VV, cm^3) en laboratorio; luego de ser secada en estufa a 102 °C hasta peso constante, se pesó en seco (PS, g) en balanza analítica Sartorius® con capacidad de 1620 g. Con estos datos se determinó el peso específico o densidad relativa básica (PE = PS/VV) de cada rodaja. A cada rodaja se le midió diámetro con corteza (D_{cc}, cm) y grosor de corteza (GC, cm), y por diferencia se calculó el diámetro sin corteza (D_{sc}, cm). Con esta información más la longitud de troza y la altura de la sección a la cual fue extraída la rodaja, se cubicaron las trozas y el árbol completo, mediante la metodología de trozas sobrepuestas (Bailey, 1995). Debido a que la densidad de la madera disminuye del centro a la periferia y de la base hacia el ápice y aumenta con la edad de los árboles juveniles, la parte media del fuste es una representación confiable de su densidad promedio (Deene y Hale, 1999). Así, con el producto del PE promedio por árbol (kg m^{-3}) y el VV de cada troza se obtuvo el PS de cada sección y los acumulados para todo el árbol (kg). Se construyeron gráficos entre la altura de la sección y el volumen acumulado con corteza (V_{cc}, m^3) y el PS acumulado de todos los árboles, con la intención de detectar anomalías en los datos obtenidos.

Muestreo de ramas y acículas

A los 30 árboles derribados se les separaron las ramas del fuste. En cada rama se identificó o midió: número de verticilo foliar (de la base de copa a punta), número consecutivo de rama, longitud del pie del árbol al punto de inserción de la rama (AR, m), longitud de rama (LR, m) y diámetro basal de rama (DBR, cm) a 1 cm de separación del fuste. El volumen de rama (V_r, cm^3) se calculó con la fórmula del cono. En la parte media de la copa, del lado norte, se eligieron aleatoriamente tres ramas de crecimiento medio. De ellas se obtuvieron tres secciones de 5 cm de longitud, que se identificaron y metieron en bolsas de papel. En laboratorio se obtuvo el VV de cada sección con ayuda de una probeta de 250 ml, así como el PV y PS en balanza analítica (este último después del secado en estufa a 102 °C). Con estos datos se pudo estimar el PE de cada muestra. Se obtuvo el PE promedio de rama por árbol

(kg m-3). Para la biomasa de ramas individuales y de árbol completo, se utilizó el mismo procedimiento empleado en el componente madera.

Para el muestreo de acículas se seleccionó aleatoriamente una submuestra de 20 árboles. En cada árbol se seleccionó al azar una rama por verticilo en la que las acículas se separaron, y luego se obtuvo el PV de las acículas y de la rama. Debidamente identificadas en bolsas de papel, las acículas se llevaron a laboratorio y se secaron a 75 °C por tres días en una estufa. Finalmente, se determinó el PS del follaje en balanza analítica Sartorius®. Con la biomasa de acículas de 314 ramas, se aplicaron modelos de regresión lineal y no lineal para apreciar su cinética en función de las variables obtenidas en las ramas. El modelo de mejor R^2 se utilizó para estimar la biomasa de acículas de 1328 ramas más. La suma de la biomasa estimada de acículas y la biomasa de la muestra proporcionaron la biomasa por árbol de este componente.

Análisis estadístico de la información y estrategias de ajuste

La base de datos con la biomasa de cada árbol y de cada uno de sus componentes (madera con corteza, ramas y acículas), y demás variables medidas, se integró. Los análisis se realizaron con el paquete estadístico SAS (SAS, 1996). En cada variable se comprobaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas. Los análisis de regresión lineal se realizaron con PROC GLM, los no lineales con PROC MODEL y los análisis de varianza con PROC ANOVA, todos ellos procedimientos de SAS. Se probaron modelos de regresión lineal y no lineal para estimar la biomasa de cada componente y la biomasa total por árbol, así como la partición de biomasa aérea.

RESULTADOS

Estimación de biomasa foliar por rama y por árbol

Todos los modelos se estimaron mediante una muestra de 314 ramas, correspondientes a 20 árboles. Las variables independientes que se utilizaron en las ecuaciones no lineales para estimar la biomasa de acículas por rama fueron (las ecuaciones 1 y 2 se probaron sobre la base que el producto de las variables mejora sustancialmente la predicción de biomasa):

$$BAR = \beta_0 \cdot ABR^{\beta_1} \cdot AR^{\beta_2} \cdot LR^{\beta_3} \qquad (1)$$

$$BAR = \beta_0 \cdot (ABR \cdot AR)^{\beta_1} \qquad (2)$$

$$BAR = DBR^{\beta_1} \cdot (1-ARR)^{\beta_2} \cdot (1+ARR)^{\beta_3} \cdot AR^{\beta_4} \cdot SEC \qquad (3)$$

(función geométrica de Edwards y Penney, 1997).

$$BAR = DBR^{\beta_1} \cdot AR^{\beta_2} \cdot (1-ARR)^{\beta_3} \cdot SEC \qquad (4)$$

(función beta modificada- De Los Santos-Posadas, 1998).

donde

BAR: biomasa de acículas por rama (g).
DBR: diámetro basal de rama (cm).
ABR: área basal de rama (= DBR^2, cm^2).
AR: altura de rama (desde el suelo, m).
LR: longitud de rama (de la base a la punta de yema apical, m).
ARR: altura relativa de rama con respecto a la longitud de copa [(AR-LFL)/LCV].

SEC: altura de rama con respecto a la altura total del árbol (AR/AT).

$\beta_{0,1,2,3,4}$: parámetros de los modelos de regresión.

En el análisis preliminar de los datos se encontraron mejores alternativas mediante el producto de área x altura x largo de rama. Estos modelos evitan la predicción negativa de valores de biomasa para ramas pequeñas de la parte inferior de la copa. Los modelos lineales empleados para explicar el comportamiento de BAR estuvieron basados en el área de la sección de la base y altura de rama, más una variable dicotómica de posición en el fuste (X_i) que permite definir la sección inferior, media o superior de la copa donde la rama estaba localizada. Tales modelos fueron tomados de De Los Santos-Posadas (1998):

$$BAR = \beta_0 + \beta_1 \cdot DBR^2 \quad (5)$$

$$BAR = \beta_0 + \beta_1 \cdot DBR^2 + \beta_2 \cdot (DBR^2 \cdot X_1) + \beta_3 \cdot (DBR^2 \cdot X_2) \quad (6)$$

$$BAR = \beta_0 + \beta_1 \cdot DBR^2 + \beta_2 \cdot DBR^2 \cdot AR + \beta_3 \cdot (DBR^2 \cdot X_1) + \beta_4 \cdot (DBR^2 \cdot X_2) \quad (7)$$

donde las variables son las mismas definidas anteriormente y

X_1: 1 si la rama está en la sección inferior 1 (AR/AT ≤ 0,6 = 1), 0 de otra manera.

X_2: 1 si la rama está en la sección media 2 (AR/AT > 0,6 y ≤ 0,8 = 2), 0 de otra manera.

El modelo no lineal de la ecuación 1 presentó el mejor ajuste, con un coeficiente de determinación de 0,82 y menor error estándar, que incluye las tres variables medidas en ramas. En contraparte, el modelo lineal (Ec. 5) dio el mayor error en la estimación de biomasa (BAR), con un R^2 = 0,70 y únicamente está en función del área basal de rama (Tabla 2).

Los valores de los parámetros de los modelos no lineales se muestran en la tabla 3. Todos los parámetros presentan significancia (p ≤ 0,05) en el valor de t, con excepción del parámetro β_3 de la ecuación 3.

Tabla 2. Cuadrados medios del error (CME), errores estándar (EE) y bondades de ajuste (R^2) para los modelos lineales y no lineales que estiman el peso seco de acículas por rama.

Ecuación	*CME*	*EE*	*R^2*
Modelo no lineal 1	887	1,68	0,82
Modelo no lineal 2	1126	1,89	0,77
Modelo no lineal 3	931	1,72	0,81
Modelo no lineal 4	928	1,71	0,81
Modelo lineal 5	1460	2,15	0,70
Modelo lineal 6	1300	2,03	0,74
Modelo lineal 7	973	1,76	0,80

Tabla 3. Parámetros estimados, errores estándar y valores de t para los modelos no lineales de estimación de biomasa foliar por rama.

Variable	*Parámetro*	*Estimación*	*Error estándar*	*t para H_0: parámetro = 0*	*Prob > |t|*
Modelo no lineal 1					
Ordenada al origen	β_0	0,10	0,04	2,37	0,0186
ABR	β_1	0,73	0,05	13,48	0,0001
AR	β_2	2,02	0,16	12,94	0,0001
LR	β_3	0,99	0,13	7,90	0,0001
Modelo no lineal 2					
Ordenada al origen	β_0	1,23	0,19	6,57	0,0001
(ABR)(AR)	β_1	1,08	0,04	32,34	0,0001
Modelo no lineal 3					
DBR	β_1	1,94	0,07	27,89	0,0001
(1-ARR)	β_2	0,83	0,17	4,87	0,0001
(1+ARR)	β_3	-0,70	1,27	-0,55	0,5813
AR	β_4	1,99	0,21	9,30	0,0001
Modelo no lineal 4					
DBR	β_1	1,94	0,07	27,71	0,0001
AR	β_2	1,89	0,07	26,47	0,0001
(1-ARR)	β_3	0,92	0,10	8,80	0,0001

Tabla 4. Parámetros estimados, errores estándar y valores de t para los modelos lineales de estimación de biomasa foliar por rama.

Variable	*Parámetro*	*Estimación*	*Error estándar*	*t para H_0: parámetro = 0*	*Prob > |t|*
Modelo lineal 5					
Ordenada al origen	β_0	4,36	2,98	1,46	0,1451
$(DBR)^2$	β_1	16,58	0,61	27,03	0,0001
Modelo lineal 6					
Ordenada al origen	β_0	3,81	3,25	1,17	0,2421
$(DBR)^2$	β_1	14,80	2,32	6,37	0,0001
$(DBR)^2x_1$	β_2	-0,32	2,19	-0,15	0,8836
$(DBR)^2x_2$	β_3	5,15	2,16	2,38	0,0180
Modelo lineal 7					
Ordenada al origen	β_0	2,70	2,81	0,96	0,3371
$(DBR)^2$	β_1	-32,24	5,00	-6,44	0,0001
$(DBR)^2(AR)$	β_2	3,36	0,33	10,26	0,0001
$(DBR)^2 x_1$	β_3	17,72	2,59	6,85	0,0001
$(DBR)^2 x_2$	β_4	15,53	2,13	7,29	0,0001

En todos los modelos lineales, la ordenada al origen no fue significativa y tampoco lo fue el parámetro β_2 de la ecuación 6, lo que sugiere que la cantidad de acículas por rama viva de la parte inferior y la parte superior de la copa no son estadísticamente diferentes. Es de destacar que en la ecuación 7 los valores de t se incrementan y los errores estándar para los parámetros de estimación se reducen (Tabla 4), lo que genera la mejor estimación lineal.

Al realizar las estimaciones con estos modelos a nivel árbol, se optó por aquellas basadas en la ecuación 7, porque producen estimaciones totales por árbol intermedias entre el modelo más optimista (Ec. 3) y el más conservador (Ec. 6), y además incluye en su estructura variables de área basal de rama, altura y la sección de copa de la rama.

Modelos por componente y de partición de biomasa aérea en el árbol

Para la madera con corteza en el fuste, los modelos de mejor estimación de biomasa están en función del diámetro normal y altura del árbol (Tabla 5). Debido al menor error estándar que genera, a la simpleza de su expresión y al coeficiente de determinación de 0,87, la ecuación 10 es la más conveniente para estimar la cantidad de madera con corteza en el fuste, $B_{mad} = 144{,}08 - 0{,}82DN^2 - 8{,}09AT + 0{,}07(DN^2 \times AT)$.

El modelo mostró un C.V. de 21% y una significancia estadística para β_1 y β_3 de $p \leq 0{,}02$ (Tabla 6).

Tabla 5. Cuadrados medios del error (CME), errores estándar (EE) y bondades de ajuste (R^2) para los modelos que estiman la biomasa de madera con corteza por árbol.

Ecuación		*CME*	*EE*	R^2
$B_{mad} = \beta_0 (DN \cdot AT)^{\beta_1}$	(8)	747	4,9	0,85*
$B_{mad} = \beta_0 + \beta_1 (DN^2 \cdot AT)$	(9)	861	5,3	0,83
$B_{mad} = \beta_0 + \beta_1 DN^2 + \beta_2 AT + \beta_3 (DN^2 \cdot AT)$	(10)	734	4,9	0,87
$B_{mad} = \beta_0 + \beta_1 DN + \beta_2 DN^2 + \beta_3 AT + \beta_4 DN^2 A$	(11)	763	5,0	0,87

*R^2 ajustada, B_{mad}: biomasa de madera con corteza (kg); DN: diámetro normal (cm); AT: altura total (m); $\beta_{0,1,2,3,4}$: parámetros de los modelos de regresión.

Tabla 6. Parámetros estimados, errores estándar y valores de t para los modelos de estimación de biomasa de madera con corteza.

Variable	*Parámetro*	*Estimación*	*Error estándar*	*t para H_0: parámetro = 0*	*Prob > |t|*
Ecuación 8					
Ordenada al origen	β_0	0,004	0,003	1,08	0,2890
DN x AT	β_1	1,841	0,159	11,58	0,0001
Ecuación 9					
Ordenada al origen	β_0	4,276	11,57	0,37	0,7147
DN^2 x AT	β_1	0,026	0,002	11,88	0,0001
Ecuación 10					
Ordenada al origen	β_0	144,088	98,8	1,46	0,1580
DN^2	β_1	-0,825	0,35	-2,31	0,0290
AT	β_2	-8,095	6,32	-1,28	0,2120
DN^2 x AT	β_3	0,074	0,02	3,40	0,0022
Ecuación 11					
Ordenada al origen	β_0	145,036	101,02	1,44	0,1630
DN	β_1	-1,548	8,69	-0,18	0,8600
DN^2	β_2	-0,742	0,59	-1,25	0,2200
AT	β_3	-7,385	7,57	-0,97	0,3300
DN^2 x AT	β_4	0,072	0,02	2,78	0,0100

En el componente biomasa en ramas se encontraron mejores ajustes al utilizar las variables referidas a la copa del árbol: diámetro (DCV), longitud (LCV) y área (AC). Los modelos de mejor ajuste se encontraron por el método SUR del procedimiento MODEL del SAS y fueron:

$$B_{rama} = 0{,}0028 \cdot DCV^{2{,}66} \cdot LCV^{0{,}44} \quad (12)$$

$$B_{rama} = 0{,}0056 \cdot DCV^{2{,}24} \cdot AC^{0{,}51} \quad (13)$$

donde

B_{rama}: biomasa de ramas (sin acículas) por árbol (kg).
DCV: diámetro medido al inicio de la copa viva (cm).
LCV: longitud de copa viva (m).
AC: área de copa (cuadrado del diámetro de copa, m).

En la ecuación 12 se tiene un nivel de ajuste con R^2 = 0,90 y un error estándar de 0,27. Para la ecuación 13 el nivel de ajuste mejora a R^2 = 0,92, y el error se reduce a 0,24. La inclusión de variables referidas a la copa mejora la estimación de biomasa en ramas, en comparación con el uso de variables clásicas de fácil medición, como diámetro y altura del árbol.

En biomasa de follaje ($B_{follaje}$), la ecuación 14 fue la de mejor ajuste:

$$B_{follaje} = 0{,}00019 \times DCV^{2{,}138} \times AT^{1{,}559}$$

con R^2 = 0,88 y error estándar de 0,14.

Para la biomasa aérea total por árbol (B_{total}) se utilizó la ecuación 15

$$B_{total} = \beta_1 (DN \times AT)^{b_1}$$

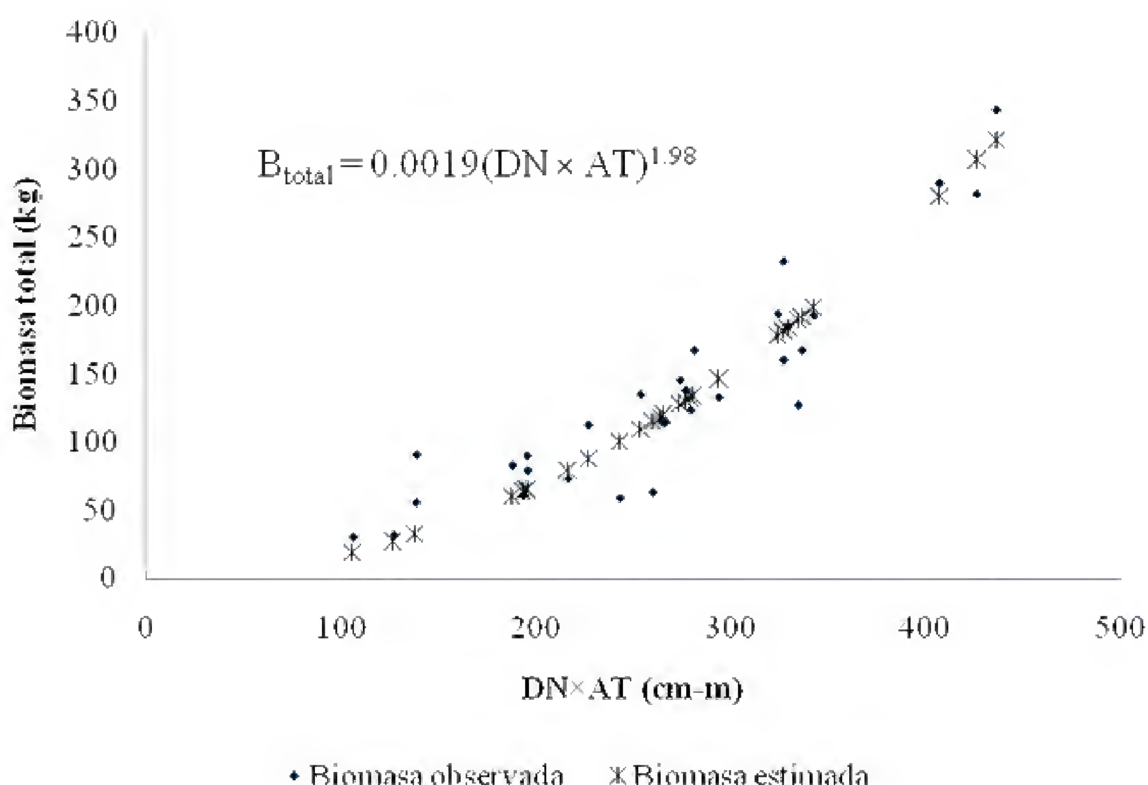


Figura 1. Estimación de biomasa total por árbol, a partir del diámetro normal y altura de individuos de *P. patula*.

y un sistema de partición de variables de la forma k_j B_{total}, donde k_j representan la fracción del componente con respecto a la biomasa total. Este sistema de ecuaciones fue ajustado mediante el método SUR del procedimiento MODEL. La biomasa total por árbol presentó un coeficiente de determinación de 0,87 y un error estándar de 5,0, modelo en el que se utilizan diámetro normal y altura total en forma no lineal (Fig. 1).

El valor de k_j obtenido para madera con corteza, ramas y follaje fue de 0,929; 0,047 y 0,024; respectivamente. Todos los parámetros del sistema de ecuaciones presentaron significancia estadística (p = 0,0001), excepto la ordenada al origen. La biomasa total del árbol se distribuye de la siguiente manera: 92,9% (R^2 = 0,99) en madera con corteza en el fuste, 4,7 % (R^2 = 0,70) en ramas sin acículas y 2,4 % (R^2 = 0,75) en follaje.

DISCUSIÓN

Estimación de biomasa foliar por rama y por árbol

La variable independiente más importante para estimar la biomasa foliar en ramas individuales es el área basal de la rama viva (función del cuadrado del diámetro de base), que proporciona una bondad de ajuste de 70% en el modelo lineal simple (Ec. 5) y una relación lineal significativa, al igual que el parámetro de estimación de la pendiente ($p \leq 0,0001$) (tablas 2 y 4). Según KüBner y Mosandl (2000), la cantidad de biomasa y área foliar en la rama está en función de la proporción de tejido vivo conductivo (albura) del área basal de rama, lo cual podría estar sucediendo con la biomasa foliar soportada por las ramas de *P. patula*. Esto fue determinado por Rodríguez-Ortiz *et al.* (2011b) para la misma especie y lugar del

presente estudio, donde cada unidad de área de albura (cm^2) del tallo abastece 0,082 m^2; 0,090 m^2 y 0,149 m^2 de área foliar en el área de sección transversal a la altura del tocón, diámetro normal e inicio de copa viva, respectivamente. Al adicionar al modelo la variable 'altura de la posición de la rama' (AR), la ecuación 2 mejora su bondad de ajuste en 6,8%, con respecto a la ecuación 5; y al incluir 'longitud de rama' (Ec. 1), el coeficiente de determinación se incrementa en 11,7%, con respecto a la ecuación 5 (tablas 3 y 4). Esta es la mejor estimación no lineal para la biomasa del follaje en ramas individuales de *P. patula*. Este resultado coincide con el encontrado para *Pinus sylvestris* donde se obtuvo una bondad de ajuste de 83% en una relación no lineal (Jonckheere *et al*., 2005). Las ecuaciones 3 y 4 tienen estimaciones de biomasa en ramas con R^2 semejante (0,81), ya que incluyen, además del diámetro basal, la altura relativa de rama con respecto a la longitud de copa viva del árbol (ARR) y la altura de rama con respecto a la altura del árbol (SEC). Los mayores valores de t en la estimación de los parámetros de regresión son indicativos del incremento en la precisión de los mismos, con la consiguiente reducción en su error estándar (Monroy y Návar, 2004). Estos requisitos deseables se cumplen en los coeficientes de regresión de la ecuación 7 (Tabla 4), con excepción de la ordenada al origen, que resultó no significativa ($p = 0{,}3371$) pero que es necesaria para producir estimaciones de mínimos cuadrados corregidos. De esta manera, la ecuación 7 es el modelo lineal de mejor estimación para BAR, ya que mejora el coeficiente de determinación en 10,2% con respecto a usar sólo ABR y proporciona resultados semejantes al encontrado en biomasa de follaje por rama en *Abies balsamea* (L.) (Gilmore y Zenner, 2005). Esto podría ser el resultado de incluir variables dicotómicas que denotan la posición de la rama (X_i), que permiten definir la sección de copa a la cual la rama pertenece y que son convenientes de incluir, como fue demostrado para otras especies de coníferas (Bartelink, 1996; Temesgen, 2003). Además, la biomasa y área foliar presentan variación entre las secciones inferior, media y superior de la copa (Kershaw y Maguirre, 1995).

Modelos por componente y de partición de biomasa aérea a nivel árbol

En la estimación del componente madera con corteza en el fuste, los modelos lineales (ecuaciones 10 y 11) presentaron mejores coeficientes de determinación (R^2) que la ecuación lineal (Ec. 9) y que la ecuación no lineal (Ec. 8) (Tabla 5). El modelo lineal (Ec. 10) con bondad de ajuste 0,87 (R^2) y un bajo error estándar (4,9), utiliza variables independientes similares a la variable combinada para volumen total de la forma DN^2, AT. Esto permite inferir que la biomasa de este componente en *P. patula* guarda una relación lineal estrecha con el diámetro, y que la inclusión de la variable AT en el modelo permite mejorar el coeficiente de determinación. Esto fue demostrado por Acosta-Mireles *et al*. (2002) y Brown (2001) en otras coníferas y coincide con los resultados encontrados por Návar *et al*. (2004) en plantaciones jóvenes de pinos en Durango, México.

La estimación de biomasa en ramas sin acículas tuvo un coeficiente de determinación de 0,92 (Ec. 13), al utilizar el diámetro al inicio de copa viva (DCV) y el área de copa proyectada (AC) en una ecuación no lineal. En *P. patula* la variable más importante fue DCV, ya que por tratarse de árboles jóvenes, el área de la sección en ese punto es casi totalmente conductiva y puede reflejar la biomasa de ramas que es capaz de soportar, como fue demostrado por Pinazo *et al*. (2007)

para *Pinus taeda*. El AC es una variable que ayuda a explicar la biomasa de ramas en la copa y además guarda una estrecha relación con el diámetro normal de *P. patula*.

Esto coincide con lo encontrado para *P. sylvestris* (R^2 = 0,9) por Jonckheere *et al.* (2005). Debido a que la biomasa de un individuo se identifica con su índice de productividad, el AC puede ser un indicador del vigor del árbol. Acosta *et al.* (2003) encontraron en diversas especies forestales que el vigor puede ser explicado por el área de la silueta de la copa (AC), misma que guarda una relación directa con la biomasa foliar y ramas. Por ello, mediante la evaluación de la biomasa en árboles jóvenes de *P. patula* se podrían conocer indirectamente los individuos que se van incorporando a nuevas categorías diamétricas con el fin de asegurar el éxito de las plantaciones. La biomasa foliar presentó una relación no lineal con el diámetro de copa viva y la altura del árbol, con una bondad de ajuste de 0,88.

Esto se contrapone con otros investigadores (Jonckheere *et al.*, 2005; Mencuccini y Grace, 1995), quienes con un modelo polinómico basado en DN encontraron ajustes con R^2 = 0,95 para este componente en *P. sylvestris.* Sin embargo, la inclusión del DCV en el modelo se justifica por la relación existente entre la biomasa aérea y el tejido conductivo que la sustenta, lo cual podría utilizarse para caracterizar la arquitectura de copas y la acumulación de biomasa en el árbol. Según diversos estudios (Fassola *et al.*, 2008; Laclau, 2003; Pinazo *et al.*, 2007), la tasa de transpiración del follaje es proporcional al área foliar y la tasa de provisión de agua hacia la copa es proporcional al área de tejido conductivo, que en el DCV es de 90% en *P. taeda.* Para otras especies, sobre todo de plantaciones jóvenes como la del presente estudio, se puede asumir que la sección del DCV es casi totalmente conductiva y puede ser utilizada como una expresión indirecta de la biomasa foliar o directa del área de albura resultante de distintos tratamientos silvícolas, como fue desarrollado en *P. taeda* por Fassola *et al.* (2005) quienes encontraron que la sección del diámetro de copa viva presentó mejores ajustes que la sección del DN, ya que a esta altura muchos tejidos han dejado de ser conductivos. El modelo propuesto para estimar biomasa foliar tiene la inherente dificultad de la medición del DCV; pero de acuerdo con Fassola *et al.* (2008) así se tienen mayores criterios con fundamentos biológicos (que no determinísticos), para que dichos modelos permitan predecir la acumulación de tejidos en árboles, como fue desarrollado por Rodríguez-Ortiz *et al.* (2011a) en el mismo lugar y especie del presente estudio, la arquitectura de la copa y consecuentemente la estructura de las ramas. Los componentes de biomasa aérea varían con la edad de rodal; cuando éste es joven, la biomasa se concentra de mayor a menor proporción en madera, ramas y follaje.

La biomasa aérea total (B_{total}) y su partición se ajustó mediante un sistema de ecuaciones que utilizan el DN y altura de árboles mediante una estructura no lineal, con R^2 de 0,87 para B_{total}. Este resultado es similar al encontrado por Schroeder *et al.* (1997) y Ter-Mikaelian y Korzukhin (1997), pues en otras especies las mejores relaciones de la biomasa aérea total se desarrollaron con modelos de regresión no lineal. A medida que un rodal envejece, la proporción del componente rama y follaje se incrementa, con la consecuente reducción en el componente madera, tal y como fue observado en una plantación de *Hevea brasiliensis* (Monroy y Návar, 2004) de 14 años, donde se reportaron valores de 79,63% y 20,36% para madera y ramas, respectivamente; a

una mayor edad, la biomasa en madera se redujo a 73,9%. Este comportamiento inicial se encontró en la plantación de *P. patula* de 14 años de edad, donde la biomasa en madera con corteza, ramas y follaje fue de 92,9%; 4,7% y 2,4%, respectivamente.

El haber encontrado un modelo preciso de biomasa para cada componente aéreo permitió obtener el ajuste de biomasa total aérea como función de variables de fácil medición (DN, AT) determinadas en inventarios forestales. Para poder aplicarlos a otras condiciones basta conocer la función de volumen para determinar factores de expansión de biomasa (FEB) variables, con los que es posible conocer la biomasa aérea total de *Pinus patula* sólo con medir su DN y AT. Así, se evitaría repetir el experimento realizado en este estudio para otras condiciones de crecimiento de la especie, pero no evitaría realizar el experimento para otras especies.

Este FEB fue determinado a partir del modelo de estimación de biomasa total (B_{total}) y del modelo de volumen total utilizado por la comunidad (VT):

$$FEB = \frac{B_{total}}{VT} = \frac{0{,}001917 \cdot (DN \cdot AT)^{1{,}977233}}{0{,}076528 \cdot \left(\frac{DN}{100}\right)^{1{,}672251} \cdot AT^{1{,}333502}} \quad (14)$$

$$FEB = 55{,}374 \cdot \left(DN^{0{,}305} \cdot AT^{0{,}644}\right) \quad (15)$$

donde

FEB: factor de expansión de biomasa variable.
B_{total}: biomasa total aérea (kg).
VT: volumen de fuste total (m^3).
DN: diámetro normal (cm).
AT: altura total (m).

El producto del FEB por el volumen total de madera en el fuste (obtenido en un inventario forestal) proporciona la estimación de biomasa total aérea del individuo; en esto radica la importancia de los modelos determinados en este estudio.

CONCLUSIONES

A diferencia de otros estudios, donde la biomasa de acículas por rama y para árbol completo se estima con base en el diámetro normal como variable independiente, en el estudio que aquí se presenta el mejor modelo de tipo lineal (Ec. 7) utiliza variables relacionadas con ramas individuales, como área de la sección, altura de rama y sección específica de la copa a la cual la rama pertenece. Estas variables son más susceptibles a las variaciones del medio ambiente, sitio y manejo del rodal.

De esta manera, las ecuaciones generadas en este trabajo serán específicas para estimar la biomasa foliar del sitio de plantación o de otros con condiciones similares con los niveles de densidad encontrados, pero que si se aplicaran a condiciones diferentes a las aquí evaluadas, podrían dar estimaciones inciertas de biomasa foliar. Sin embargo, la utilidad de los modelos de biomasa aérea encontrados es su compatibilidad con las ecuaciones de estimación del volumen maderable, situación que permite utilizarlos en otras condiciones, mediante el empleo de factores de expansión de biomasa variables.

Aunque la heterocedasticidad (heterogeneidad de varianzas asociadas con el tamaño de las ramas) es una característica implícita de las variables dasométricas, que otros métodos de biomasa foliar poseen, los modelos aquí propuestos para *P. patula* reducen estos problemas porque la copa se clasificó en secciones, y producen una estimación media de follaje de 3,2282 kg árbol^{-1} e incluyen una variable de posición (X_i) que determina la sección específica de la

copa donde la rama pertenece. Esto puede permitir detectar diferencias en la distribución del follaje en la copa, así como obtener funciones de distribución de biomasa foliar y ser ventajosas en las comparaciones de las predicciones totales.

La biomasa total del componente aéreo para *Pinus patula* se estimó mediante el diámetro normal y la altura del árbol en un modelo no lineal con bondad de ajuste de (R^2) 0,87. A una edad de 14 años, la biomasa se distribuye en 92,9%; 4,7% y 2,4% para madera, ramas y follaje, respectivamente. Estos coeficientes de partición son muy similares a los estimados por Figueroa-Navarro *et al.* (2010) para *P. patula* cultivado en rodales naturales en Zacualtipán, Hidalgo (89,2%; 9,5% y 1,3% para madera, ramas y follaje, respectivamente) donde, sin embargo, existe una mayor concentración de biomasa total en ramas, sin duda debida a la heterogeneidad del espaciamiento que impide una poda natural uniforme. No obstante, la proporción de follaje está en general muy por debajo del 4%-6% encontrado en otras especies de coníferas, lo que sugiere que como especie, *P. patula* tiene una eficiencia fotosintética notable.

REFERENCIAS

Acosta M., M., F. Carrillo A. y O.S. Magaña T. 2003. Técnica de la silueta para estimar área foliar y biomasa aérea en especies forestales. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 28:45-56.

Acosta-Mireles, M., J. Vargas-Hernández, A. Velázquez-Martínez y J. D. Etchevers-Barra. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. Agrociencia 36:725-736.

Bailey, R.L. 1995. Upper-stem volumes from stem-analysis data: an overlapping bolt method. Canadian Journal of Forest Research 25:170-173.

Barnes, R.D., J.S. Birks, G. Battle y L.J. Mullin. 1994. The genetic control of ring width, wood density and tracheid length in the juvenile core of *Pinus patula*. Southern African Forestry Journal 169:15-20.

Bartelink, H.H. 1996. Allometric relationships on biomass and needle area of Douglas-fir. Forest Ecology and Management 86:193-203.

Brown, S. 2001. Measuring carbon in forests: current status and future challenges. Environmental Pollution 116:363-372.

De Los Santos-Posadas, H.M. 1998. Estimation of individual branch and whole tree leaf biomass from loblolly pine. Master of Science, University of Georgia. Athens, Georgia. 86 p.

Deene, M. y M. Hale. 1999. Cell wall and lumen percentages in relation to wood density of *Nothofagus nervosa*. IAWA Journal 20:23-36.

Dvorak, W.S., G.R. Hodge, J.E. Kietzka, F. Malan, L.F. Osorio y T.K. Stanger. 2000. *Pinus patula*. *In*: Conservation and Testing of Tropical and Subtropical Forest Tree Species by the CAMCORE Cooperative, College of Natural Resources, NCSU. Raleigh, NC. EUA. p: 148-173.

Edwards, Jr. C.H. y D. Penney. 1997. Calculus with analytic geometry. 4th Edition. Prentice Hall. 960 p.

Fassola, H., E. Crechi, S. Barth, A. Keller, M. Pinazo, R. Martiarena, A. Von Wallis e I. Figueredo. 2008. Relación entre la biomasa aérea y la sección transversal en la base de copa viva de *Pinus taeda* L. en el norte de la provincia de Misiones, Argentina. *In*: XIII Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. Facultad de Ciencias Forestales, UNAM-EEA Montecarlo, INTA. El Dorado, Misiones, Argentina.

Fassola, H.E., S.M. Lacorte, A.N.I. Pachas y R. Pezzuti. 2005. Factores que influencian la producción de biomasa forrajera de *Axonopus jesuiticus* Valls, bajo dosel de *Pinus taeda* L. en el nordeste de Corrientes. Revista de Investigaciones Agropecuarias 34:21-38.

Figueroa-Navarro, C.M., G. Ángeles-Pérez, A. Velázquez-Martínez y H.M. de los Santos-Posadas. 2010. Evaluación de la biomasa en un bosque bajo manejo de *Pinus patula Schltdl. et Cham.* en Zacualtipán, Hidalgo. Rev. Mex. Cien. For. 1(1): 105-112.

Garzuglia, M. y M. Saket. 2003. Wood volume and woody biomass. Food and Agricultural Organization of the United Nations. Roma, Italy. 30 p.

Gholz, H.L. y W.P. Cropper. 1991. Carbohydrate dynamics in mature *Pinus elliottii* var. *elliottii* trees. Canadian Journal of Forest Research 21:1742-1747.

Gilmore, D.W. y E.K. Zenner. 2005. Foliage-sapwood area relationships for balsam fir in North-Central Minnesota. NJAF 22:203-210.

Gower, S.T. y J.M. Norman. 1991. Rapid estimation of leaf-area index in conifer and broad-leaf plantations. Ecology 72:1896-1900.

Gutiérrez-Guzmán, B., J.D. Etchevers-Barra, A. Velázquez-Martínez y J. Almaraz-Suárez. 2004. Influencia del aile (*Alnus firmifolia*) en el crecimiento de plantas de *Pinus patula*. Terra Latinoamericana 23:89-96.

Houghton, R.A., D.L. Skole y C.A. Nobre. 2000. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. Nature 403: 301-304.

Jonckheere, I., B. Muys y P. Copping. 2005. Allometry and evaluation of in situ optical LAI determination in Scots pine: a case study in Belgium. Tree Physiology 25:723-732.

Kershaw, Jr. J.A. y D.A. Maguirre. 1995. Crown structure in western hemlock, Douglas-fir, and grand fir in western Washington: trends in branch-level mass and leaf area. Canadian Journal of Forest Research 25:1897-1912.

KüBner, R. y R. Mosandl. 2000. Comparison of direct and indirect estimation of leaf area index in mature Norway spruce stands of eastern Germany. Canadian Journal of Forest Research 30: 440-447.

Laclau, P. 2003. Biomass and carbon sequestration of ponderosa pine plantations and native cypress forests in northwest Patagonia. Forest Ecology and Management 180:17-333.

Margolis, H., R. Oren, D. Whitehead y M.R. Kaufmann. 1995. Leaf area dynamics of conifer forests. *In*: Smith W.K. y T.M. Hinckley (Eds.). Eco-

physiology of coniferous forests. Academic Press. p: 181-223.

Mencuccini, M. y J. Grace. 1995. Climate influences the leaf area/sapwood area ratio in Scots pine. Tree Physiology 15:1-10.

Monroy, R.C. y J.J. Návar. 2004. Ecuaciones de aditividad para estimar componentes de biomasa de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg., en Veracruz, México. *Madera y Bosques* 10:29-43.

Návar C., J.J., J. Nájera y E. Jurado. 2002. Biomass estimation equations in the Tamaulipas thornscrub of northeastern Mexico. Journal of Arid Environments 52:167-179.

Návar C., J.J., N. González B., J.J. Graciano L., V. Dale y B. Parresol. 2004. Additive biomass equations for pine species of forest plantations of Durango, Mexico. *Madera y Bosques* 10:17-28.

Perry, P.J. 1991. The pines of Mexico and Central America. Timber Press Inc. Portland, Oregon. EUA. 231 p.

Pinazo, M.A., R.A. Martiarena, A. Von Wallis, E. Crechi, N.M. Pahr y O. Knebel. 2007. Efectos de la intensidad de raleo sobre la compartimentalización y stock de carbono en plantaciones de *Pinus taeda* L. establecido sobre ultisoles de Misiones. Revista de Investigaciones Agropecuarias 36:5-20.

Rodríguez-Ortiz, G., A. Aldrete, V.A. González-Hernández, H.M. De Los Santos-Posadas A. Gómez-Guerrero y A. M. Fierros-González. 2011a. ¿Afectan los aclareos la acumulación de biomasa aérea en una plantación de *Pinus patula*? Agrociencia 45(6):719-732.

Rodríguez-Ortiz, G., V.A. González-Hernández, A. Aldrete, H.M. De Los Santos-Posadas A. Gómez-Guerrero y A. M. Fierros-González. 2011b. Modelos para estimar crecimiento y eficiencia de crecimiento en plantaciones de *Pinus patula* en respuesta al aclareo. Revista Fitotecnia Mexicana 34(3):205-212.

Sánchez-González, A. 2008. Una visión actual de la diversidad y distribución de los pinos de México. *Madera y Bosques* 14(1):107-120.

SAS Institute. 1996. SAS/STAT User´s guide. SAS Institute, Inc., Raleigh, NC.

Schroeder, P., S. Brown, J. Mo, R. Birdsey y C. Cieszewsky. 1997. Biomass estimation for temperate broadleaf forest of the United States using inventory data. Forest Science 43:424-434.

Servicios Técnicos Forestales Ixtlán de Juárez. 2008. Informe de actividades de los servicios técnicos forestales de Ixtlán de Juárez, Oaxaca. s/p.

Temesgen, H. 2003. Evaluation of sampling alternatives to quantify tree leaf area. Canadian Journal of Forest Research 33:82-95.

Ter-Mikaelian, M.T. y M.D. Korzukhin. 1997. Biomass equations for sixty five North American tree species. Forest Ecology and Management 97:1-24.

TIASA (Técnica Informática Aplicada. S. A.). 1993. Programa de manejo integral forestal de Ixtlán de Juárez 1993-2002. Oaxaca, México. 290 p.

Valencia M., S. y J.J. Vargas H. 2001. Correlaciones genéticas y selección simultánea del crecimiento y

densidad de la madera de *Pinus patula*. Agrociencia 35:109-119.

Woods, K.D., A.H. Feiveson y D.B. Botkin. 1991. Statistical analysis for biomass density and leaf-area index estimation. Canadian Journal of Forest Research 21:974-989.

Manuscrito recibido el 17 de abril de 2010.
Aceptado el 13 de marzo de 2012.

Este documento se debe citar como: Rodríguez-Ortiz, G., H.M. De los Santos-Posadas, V.A. González-Hernández, A. Aldrete, A. Gómez-Guerrero y A.M. Fierros-González. Modelos de biomasa aérea y foliar en una plantación de pino de rápido crecimiento en Oaxaca. *Madera y Bosques* 18(1):25-41.

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

La madera de cinco especies de *Zanthoxylum* L. (Rutaceae) con distribución en México

The wood of five species of *Zanthoxylum* L. (Rutaceae) with distribution in Mexico

Fernanda Arenas Flores[1], Agustina Rosa Andrés-Hernández[1*], Teresa Terrazas[2] y Carlos Castañeda[1]

RESUMEN

En este trabajo se describen y comparan las características anatómicas de la madera de cinco especies de *Zanthoxylum*. Los caracteres cualitativos y cuantitativos de la madera se analizaron a través de análisis multivariados, con la finalidad de conocer si existen caracteres que contribuyan a distinguirlas o agruparlas en las secciones reconocidas para el género. Las especies comparten los caracteres diagnósticos del género: pared de elementos de vaso > 4 µm, punteaduras alternas con diámetro < 6 µm, excepto por *Z. hidalgense*, fibras libriformes y parénquima marginal en bandas. Las cinco especies tienen porosidad semianular que las diferencia de otras especies de *Zanthoxylum* con porosidad anular y en la mayoría porosidad difusa. Se registran por primera vez para el género, drusas en vasos y fibras septadas. Los resultados del análisis de componentes principales y el fenograma mostraron que las cinco especies son entidades diferentes con una combinación de caracteres única y que los caracteres de la madera no sustentan las secciones. *Zanthoxylum purpusii* se caracteriza por la presencia de canales verticales traumáticos y las fibras septadas; *Z. arborescens, Z. purpusii* y *Z. liebmannianum* se agrupan por el parénquima marginal en bandas y los radios biseriados. *Zanthoxylum hidalgense* tiene los vasos más anchos, las fibras más largas y anchas y los radios mas altos y anchos, mientras que *Z. arborescens* y *Z. liebmannianum tienen* vasos más angostos y fibras más cortas y angostas. El diámetro de los vasos y la longitud y diámetro de las fibras parecen estar relacionadas con el tipo de vegetación donde las especies estudiadas se distribuyen.

PALABRAS CLAVE:
Anatomía, madera, México, porosidad semianular, Rutaceae, *Zanthoxylum*.

ABSTRACT

Wood anatomy of five species of *Zanthoxylum* is described and compared. Qualitative and quantitative characters were analyzed through multivariate analyses to identify wood characters that permit to distinguish among species or to group them in the recognized sections within the genus. The species shared the diagnostic wood character for *Zanthoxylum* as of vessel wall thickness < 4 µm, intervessel pits < 6 µm, except for *Z. hidalgense*, libriform fibers, and parenchyma in marginal bands. The semiring-porosity distinguished the studied species of other *Zanthoxylum* species. The occurrence of druses in vessels and septate fibers are reported for the first time for the genus. The results of principal component analysis and the phenogram support the recognition of the five species studied based con a unique combination of wood characters; however, wood characteristics do not always support inclusion in the current sections. *Zanthoxylum purpusii* is recognized by the vertical traumatic canals

1 Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Escuela de Biología, Blvd. Valsequillo y Av. San Claudio. Edificio 76, Ciudad Universitaria, Col. Jardines de San Manuel, CP 72570, Puebla. Pue., México.
2 Departamento de Botánica, Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, DF, 04510, México.
* Autor para correspondencia. c.e.: arahdm@yahoo.com.mx

and septate fibers; *Z. arborescens, Z. purpusii* and *Z. liebmannianum* are grouped by parenchyma in marginal bands and biseriate rays. *Zanthoxylum hidalgense* is the species with the wider vessels, wider and longer fibers as well as taller and wider rays while *Z. arborescens* and *Z. liebmannianum* show the narrower vessels and shorter and narrower fibers. Vessel diameter and length and diameter of fibers appear to be related to the vegetation type where the species studied are distributed.

KEY WORDS:
Anatomy, Mexico, Rutaceae, Semiring porosity, wood, Zanthoxylum.

INTRODUCCIÓN

La familia Rutaceae es conocida como fuente de frutas cítricas y maderas satinadas, consiste en alrededor de 155 géneros y 930 especies de árboles aromáticos y arbustos (Judd *et al.*, 2008). El género *Zanthoxylum* pertenece a esta familia y se ha clasificado dentro de la subfamilia Rutoideae, tribu Zanthoxyleae (Stace *et al.*, 1993), comprende aproximadamente 200 especies, distribuidas en los trópicos de América y Asia. La mayoría de las especies de *Zanthoxylum* son árboles maderables, comúnmente presentan espinas en el tallo de origen floemático o del corcho (Barber, 1982); sus flores son 3,4,5-meras, epígeas, pequeñas (3 mm - 6 mm) y con perianto segmentado o ligeramente diferenciado en pétalos y sépalos, pétalos de color blanco-crema o verde; los frutos son 1-5 folicular con folículos libres o ligeramente connados lateralmente; las semillas son relativamente pequeñas (3 mm-8 mm), de forma globosa, de color negro, brillosas y con la cicatriz funicular visible (Reynel, 1995).

Engler (1896) dividió al género en dos subgéneros *Fagara* y *Zanthoxylum. Fagara,* que se caracteriza por la presencia de perianto completo (sépalos y pétalos presentes) y lo subdividió en cuatro secciones (*Macqueria*, *Pterota*, *Perijea* y *Tobinia*). El subgénero *Zanthoxylum* se caracteriza por la presencia de perianto simple (sólo con tépalos). El mismo Engler (1931) reclasificó al subgénero *Fagara* con base en caracteres morfológicos de la flor y lo dividió en cuatro secciones que no corresponden a su primera propuesta (*Blackburnia*, *Macqueria* con tres subsecciones, *Paniculatae*, *Perijea*, *Pterota-Mayu* y *Tobinia*). Reynel (1995) no reconoce los subgéneros de Engler y divide al género *Zanthoxylum* en cinco secciones: *Macqueria* con una distribución Neotropical y en el Viejo Mundo, y perianto completo o incompleto con flores 4-5-meras, estigmas discoidales o globosos. *Novo*, incluye las especies del Viejo Mundo con un perianto reducido o perianto segmentado 3-5-meras persistente en el fruto. *Pterota*, con una distribución Neotropical, se caracteriza por tener perianto segmentado con flores 4-meras y estigmas globosos. *Tobinia*, también del Neotrópico, la distingue por la presencia de flores 3-4-meras. *Zanthoxylum* con distribución en el Nuevo Mundo y Asia, presenta perianto segmentado indiferenciado o no, flores 3-meras, estigma globoso y ovarios con glándulas.

En cuanto a la madera de *Zanthoxylum* se han realizado descripciones macroscópicas y microscópicas de algunas especies de la sección *Macqueria* que se distribuyen en Sudamérica (Loureiro *et al.*, 1981; Carrera y Pérez, 1988; Mendes *et al.*, 1999; León, 2006), tienen porosidad difusa, vasos con un grosor de pared de 3.5 µm a 6 µm, fibras no septadas y comúnmente parénquima en bandas; sin embargo, también se presenta el parénquima paratraqueal escaso y apotraqueal marginal. A la fecha poco se conoce de la madera de las especies de *Zanthoxylum* que se distribuyen en México (Bajaras-

Morales *et al.,* 1997). Reynel (1995) trabajó la anatomía de la madera de 61 especies y con base en sus resultados organiza seis grupos. Uno de sus grupos se caracteriza por la presencia de porosidad difusa, diámetro de las punteaduras entre 4 µm y 5 µm, fibras de delgadas a gruesas, parénquima apotraqueal marginal en bandas o parénquima paratraqueal escaso, radios multiseriados y uniseriados, que corresponden a especies de la sección *Blackburnia* (*sensu* Engler) y a *Z. flavum* de la sección *Macqueria*. En su trabajo, Reynel no integra descripciones por especie y los grupos propuestos no corresponden a ninguno de los sistemas de clasificación infragenéricos.

OBJETIVO

Describir y comparar las características anatómicas de la madera de cinco especies de *Zanthoxylum* que se distribuyen en México, con el propósito de conocer si existen caracteres anatómicos que contribuyan a distinguirlas y agruparlas en las diferentes secciones *sensu* Reynel para el género.

METODOLOGÍA

El material de estudio corresponde a muestras de madera de cinco especies pertenecientes al género *Zanthoxylum,* las cuales fueron recolectadas en diferentes localidades en los estados de Puebla y Querétaro (Apéndice). Las muestras se obtuvieron con un serrote, del tronco principal a una distancia 10 cm a 25 cm del suelo. Todas las muestra se fijaron en formalina-ácido acético glacial-alcohol etílico 95% por 24 h-48 h (Ruzin, 1999) y se almacenaron en una solución de glicerina-alcohol etílico 95%-agua (1:1:1) hasta iniciar la microtecnia. Cortes transversales, tangenciales y radiales (20 µm) se hicieron con un micrótomo de deslizamiento (Leica SM 2000R). Para cada individuo, cortes sin aclarar y aclarados (50% -v/v- solución acuosa de Clorox comercial) fueron teñidos con safranina-verde rápido (Ruzin, 1999) y montados en resina sintética. Para obtener el material disociado se obtuvieron pequeñas astillas de la muestras de madera cercana al cámbium vascular y se colocaron en solución de Jeffrey (Berlyn y Miksche, 1976). Una vez disociada la madera se tiñeron en safranina acuosa (1%) y montaron en resina sintética para obtener la longitud de los elementos de vaso y las fibras. La terminología con base en las recomendaciones de la Asociación Internacional de Anatomistas de la Madera (IAWA Committee, 1989). Se hicieron 25 mediciones para cada caracter por individuo con un microscopio Olympus BX51 y analizador de imágenes (Image ProPlus version 6.1, Media Cybernetics, 2006). Se calculó la relación lf/lev, donde lf es la longitud de la fibra y lev es la longitud del elemento de vaso. Los valores superiores a 2,6 indican extenso crecimiento intrusivo de la fibra (Carlquist, 2001). En las descripciones se presentan los valores de la media y en paréntesis los valores mínimo y máximo.

Para estimar la semejanza anatómica entre especies de *Zanthoxylum* se construyó una matriz de datos con 22 caracteres cuantitativos y cualitativos por catorce Unidades Taxonómicas Operativas (los 14 de individuos de las cinco especies), la matriz se estandarizó con unidades de desviación estándar con el objetivo de mantener el principio de ponderación entre los caracteres (Sneath y Sokal, 1973). Con esta matriz se creó una matriz de similitud mediante el coeficiente de correlación de Pearson y se generó un fenograma con el algoritmo de amalgamiento del promedio no ponderado de los pares de grupos UPGMA por

sus siglas en inglés –unweighted pair-group average–. A partir de la matriz estandarizada de los 22 caracteres, se obtuvo una matriz de correlación con el coeficiente de correlación Pearson y se calcularon los eigenvectores y eigenvalores, con la finalidad de conocer el porcentaje de contribución de los primeros tres componentes a la variabilidad total. Ambos análisis se realizaron con el programa NTSYS-PC versión 2.1 (Rohlf, 1998).

RESULTADOS

A continuación se presenta una descripción general y por especie, en la tabla 1 se sintetizan algunos de los caracteres cuantitativos y cualitativos para las especies, en las figuras 1-15 se ilustran las características distintivas como porosidad, inclusiones y parénquima axial y radial.

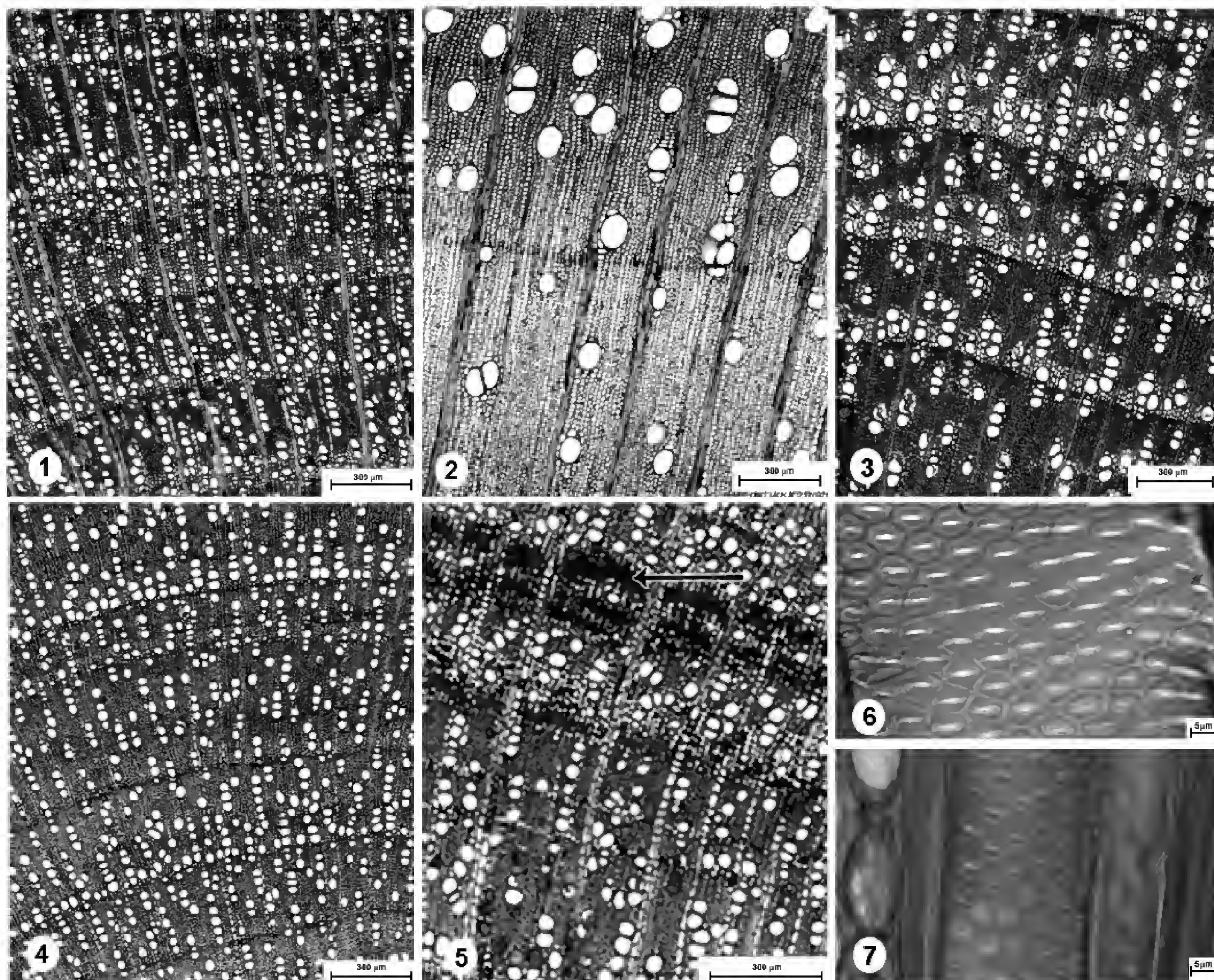
Las maderas de *Zanthoxylum* presentan porosidad semianular (figuras 1-5), los vasos estan arreglados en hileras radiales y solitarios; las hileras radiales van de 2-4. Predominan los de 2 en *Z. hidalgense* en 63%, en *Z. liebmannianum* en 74%, en *Z. purpusii* en 87% y para *Z.* sp. en 73%, predominan las hileras radiales de 4 en *Z. arborescens* en 86%. El resto de los porcentajes para cada especie corresponde a los vasos solitarios. El porcentaje menor de vasos/mm^2 es de 7-9 para *Z. hidalgense* y el mayor de 24-30 para *Z. arborescens*. El promedio del lumen de los vasos en la madera temprana es de 33 (22-48) µm y en la madera tardía de 19 (8-28) µm para las especies *Z. arborescens* y *Z. liebmannianum*; para *Z. purpusii* de 40 (25-56) µm en la madera temprana y de 25 (13-35) µm en la madera tardía; en *Z.* sp. de 48 (31-70) µm en la madera temprana y de 34 (23-50) µm en la madera tardía; los valores más altos los presenta *Z. hidalgense* de 95 (61-124) µm y 62 (28-88) para la madera temprana y tardía respectivamente. El grosor de la pared de los vasos es semejante entre las especies, así como entre la madera temprana y tardía con un promedio mínimo de 4 µm en *Z. arborescens* y máximo de 6 µm en *Z. hidalgense*. La longitud de los vasos es variable de 255 (127-400) µm en *Z. sp.* a 386 (215-641) µm en *Z. purpusii* (Tabla 1). Las placas de perforación son simples, las punteaduras intervasculares son alternas (figuras 6 y 7) con diámetro de 3 (2-5) µm en *Z. arborescens* y *Z. liebmannianum,* de 4(2-5) µm en *Z. purpusii* y *Z.* sp. y de 7(5-10) µm en *Z. hidalgense*; las punteaduras vaso-radio son similares a las intervasculares. Las especies presentan fibras libriformes, *Z. hidalgense* presenta valores mayores con 887 (285-1548) µm en la longitud de fibras y de 14 (7-22) µm en el diámetro y *Z. liebmannianum* con los valores menores 585 (312-999) µm en la longitud de fibras y de 8 (5-12) µm en el diámetro de las fibras. Se muestras los valores de la media para las especies en la tabla 1.

Zanthoxylum arborescens. Los vasos sin contenidos, punteaduras con contenidos de color ámbar de naturaleza fenólica y algunas drusas (Fig. 15). Fibras libriformes no septadas, Lf/lev = 2,29. Parénquima marginal en bandas de dos células de espesor y apotraqueal difuso; así como paratraqueal escaso (Fig. 8) y vasicéntrico; cristales prismáticos. Radios heterogéneos, 5-6 radios/mm, de 1-4 series (Fig. 12), en su mayoría biseriados altura de 273 (110-556) µm y 11 (4-30) células en altura, anchura de 31 (8-60) µm, las células erectas en los márgenes de los radios; contenidos obscuros y cristales prismáticos en algunas células.

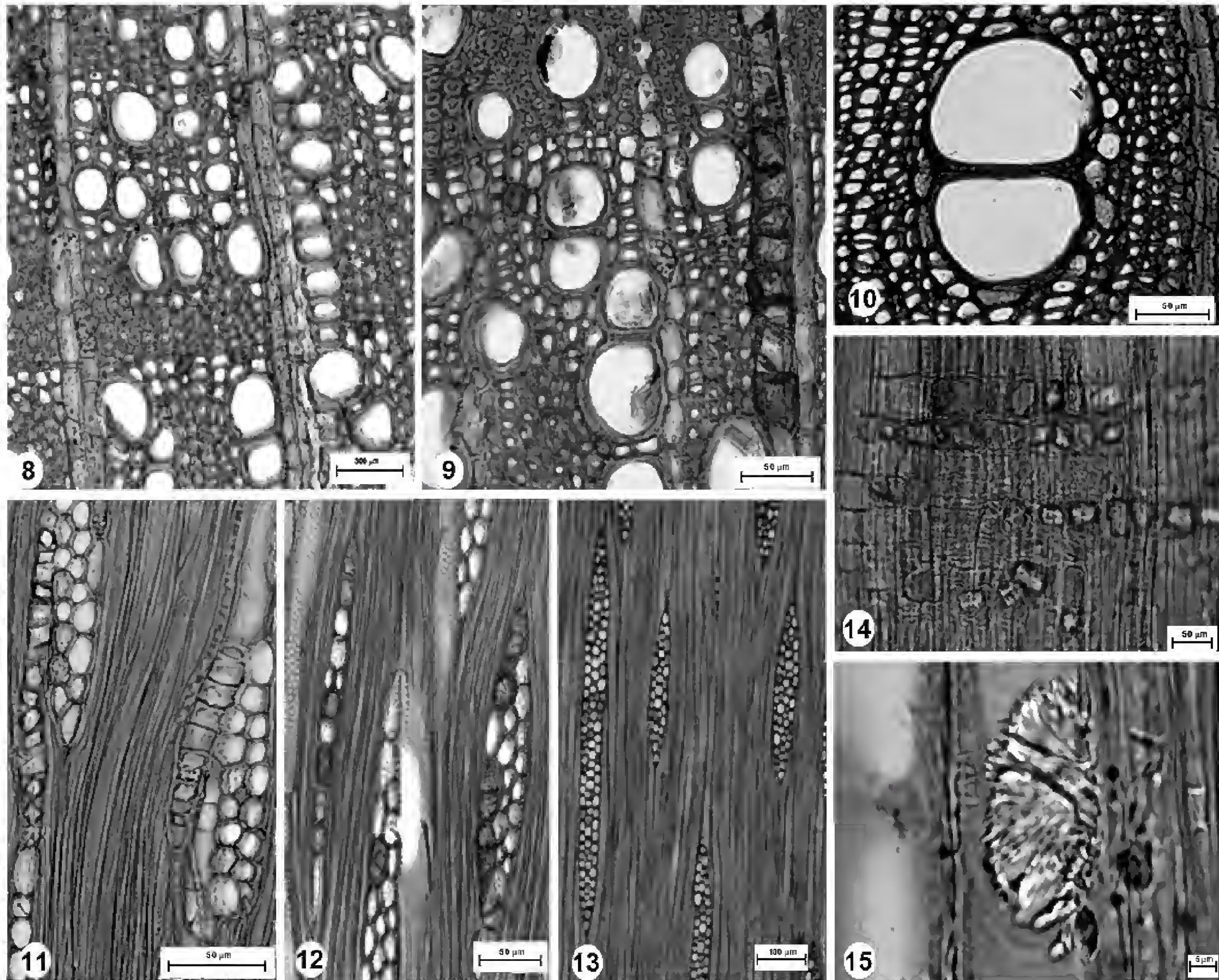
Zanthoxylum hidalgense. Los vasos y punteaduras sin contenidos de naturaleza fenólica o mineral. Fibras libriformes no septadas, Lf/lev = 3,04.

Tabla 1. Valores de la media y presencia de caracteres anatómicos cuantitativos y cualitativos de la madera de cinco especies de *Zanthoxylum*.

Caracteres	Especies				
	Z. arborescens	*Z. hidalgense*	*Z. liebmannianum*	*Z. purpusii*	*Z. sp*
Vasos/mm^2 en la madera tardía	27,51	8,01	24,88	18,95	13,23
Vasos/mm^2 en la madera temprana	3,82	3,92	6,36	2,49	3,55
Diámetro de vasos madera temprana (µm)	32,89	95,25	33,64	40,05	47,84
Grosor pared de vasos madera temprana (µm)	4,55	5,85	4,78	4,92	5,60
Diámetro de vasos madera tardía (µm)	19,31	62,34	18,70	24,91	34,35
Grosor pared de vasos madera tardía (µm)	4,11	5,64	4,20	4,62	5,43
Longitud del elementos de vaso (µm)	348,32	291,74	278,32	385,71	255,53
Diámetro de punteadura intervascular (µm)	3,45	6,85	3,19	3,98	4,04
Diámetro de fibras (µm)	9,38	14,13	8,22	9,83	10,95
Longitud de fibras (µm)	797,22	886,81	585,20	835,19	858,99
Radios/mm	5,52	3,88	6,18	4,99	5,59
Altura de radios (µm)	272,80	329,03	137,34	280,99	225,29
Anchura de radios (µm)	30,88	40,46	15,98	29,88	23,08
Número de células de altura en radios	11	15	6	10	11
Número de células de anchura en radios	2	3	2	2	2
Radios homogéneos	—	†	†	—	—
Radios heterogéneos	†	—	—	†	†
Drusas	†	—	—	†	—
Canales verticales traumáticos	—	—	—	†	—
Parénquima apotraqueal difuso	†	†	†	—	†
Parénquima marginal en bandas	†	—	†	†	†
Parénquima paratraqueal escaso	†	—	—	†	—
Parénquima paratraqueal vasicéntrico	†	†	—	—	†



Figuras 1-7. Porosidad semianular y elementos de vasos en *Zanthoxylum.*
1. vasos en hileras radiales (2-4) predominan los de 4, en la madera tardía, *Z. arborescens*; **2**. vasos en grupos escasos, predominan las hileras radiales de 2, *Z. hidalgense*; **3**. vasos en arreglo dendrítico en madera tardía, *Z. sp.*; **4**. vasos en hileras radiales, *Z. liebmannianum* y **5**. canales traumáticos, *Z. purpusii.*
6. Punteaduras intervasculares alternas > 5 μm, *Z. hidalgense.*
7. Punteaduras intervasculares alternas < 5 μm, *Z.arborescens*.



Figuras 8-15. Parénquima axial y radial en *Zanthoxylum*. **8**. Parénquima paratraqueal escaso, *Z. arborescens*; **9**. Parénquima marginal en bandas y paratraqueal escaso, *Z. purpusii*; **10**. Parénquima paratraqueal vasicéntrico, *Z. hidalgense*; **11**. Serie parenquimatosa con cristales prismáticos, *Z.* sp.; **12**. Radios uni, bi y triseriados, *Z. arborescens*; **13**. Radios triseriados, *Z. hidalgense*; **14**. Radios heterogéneos con cristales prismáticos, *Z. liebmannianum*; **15**. Drusa en elemento de vaso, *Z. arborescens*.

Parénquima apotraqueal difuso y paratraqueal vasicéntrico (Fig. 10). Radios homogéneos, 3-4 radios/mm, de 1-6 series, en su mayoría triseriados (Fig. 13), con una altura de 329 (80-703) µm y 14 (3-31) células de altura, con anchura de 40 (10-69) µm; contenidos de color obscuro y cristales prismáticos en algunas células.

Zanthoxylum liebmannianum. Los vasos sin contenidos y punteaduras ocasionalmente contenidos de color ámbar y drusas. Fibras libriformes no septadas, Lf/lev = 2,10. Parénquima marginal en bandas compuesto de una sola célula de espesor y apotraqueal difuso, así como paratraqueal escaso; con cristales prismáticos en algunas células. Radios homogéneos, 5-7 radios/mm, de 1-3 series en su mayoría biseriados, altura de 137 (73-296) µm, 7 (3-16) células de altura, anchura de 16 (5-31) µm, contenidos de color obscuro y cristales prismáticos en algunas células (Fig. 14).

Zanthoxylum purpusii. Los vasos sin contenidos color ámbar, pero con algunas drusas. Fibras libriformes septadas, Lf/lev = 2,29. Parénquima marginal en bandas de 3 a 4 células de espesor y paratraqueal escaso (Fig. 9) con cristales prismáticos; canales verticales traumáticos (Fig. 5). Radios heterogéneos, 4-5 radios/mm, de 1-4 series, en su mayoría biseriados, altura de 280 (90-620) µm, 10 (2-24) células de altura, anchura de 30 (4-61) µm, las células erectas en los márgenes de los radios; contenidos de color obscuro y cristales prismáticos en algunas células.

***Zanthoxylum* sp.** Los vasos con tendencia a arreglo dendrítico (Fig. 3), contenidos color ámbar en algunos vasos. Fibras libriformes no septadas, Lf/lev = 3,24. Parénquima marginal en bandas de dos células de espesor y apotraqueal difuso, así como paratraqueal vasicéntrico; abundantes cristales prismáticos (Fig. 11). Radios heterogéneos, 5-6 radios/mm, de 1-3 series en su mayoría biseriados (Fig. 11), altura de 225 (66-547) µm, 11 (2-29) células de altura, anchura de 23 (11-34) µm; las células erectas en los márgenes de los radios; cristales prismáticos en algunas células.

Análisis multivariados. El análisis de componentes principales reveló que tres componentes explican cerca de 95% de la varianza y los caracteres que tuvieron mayor peso fueron diámetro de vasos y grosor de pared de vasos en madera temprana y tardía, diámetro de punteaduras intervasculares y diámetro de fibras (Tabla 2). Estos caracteres junto con los caracteres cualitativos permitieron distinguir a las cinco especies de *Zanthoxylum* (Fig. 16). En el fenograma se recuperan dos grupos con base en la similitud de su madera (Fig. 17). En el grupo A están *Z. hidalgense* y *Z.* sp. a una distancia de 0,24. En el grupo B grupo se recuperan las especies *Z. arborescens* y *Z. purpusii,* estas especies se relacionan a una distancia de 0,7, considerando a estas dos especies como las más parecidas anatómicamente, entre estas especies las distancias no son significativas, pero la ubicación entre ellas en el fenograma (Fig. 17) es separada y *Z. liebmannianum* se une a estas dos especies a una distancia de 0,13.

DISCUSIÓN

La madera de las cinco especies de *Zanthoxylum* comparten las características anatómicas, grosor de la pared de los vasos (4,11 µm-5,65 µm), punteaduras alternas pequeñas (< 5 µm de diámetro), fibras libriformes y parénquima en bandas. Estos caracteres ya se habían considerado como diagnósticos para la madera del género (Loureiro *et al*., 1981;

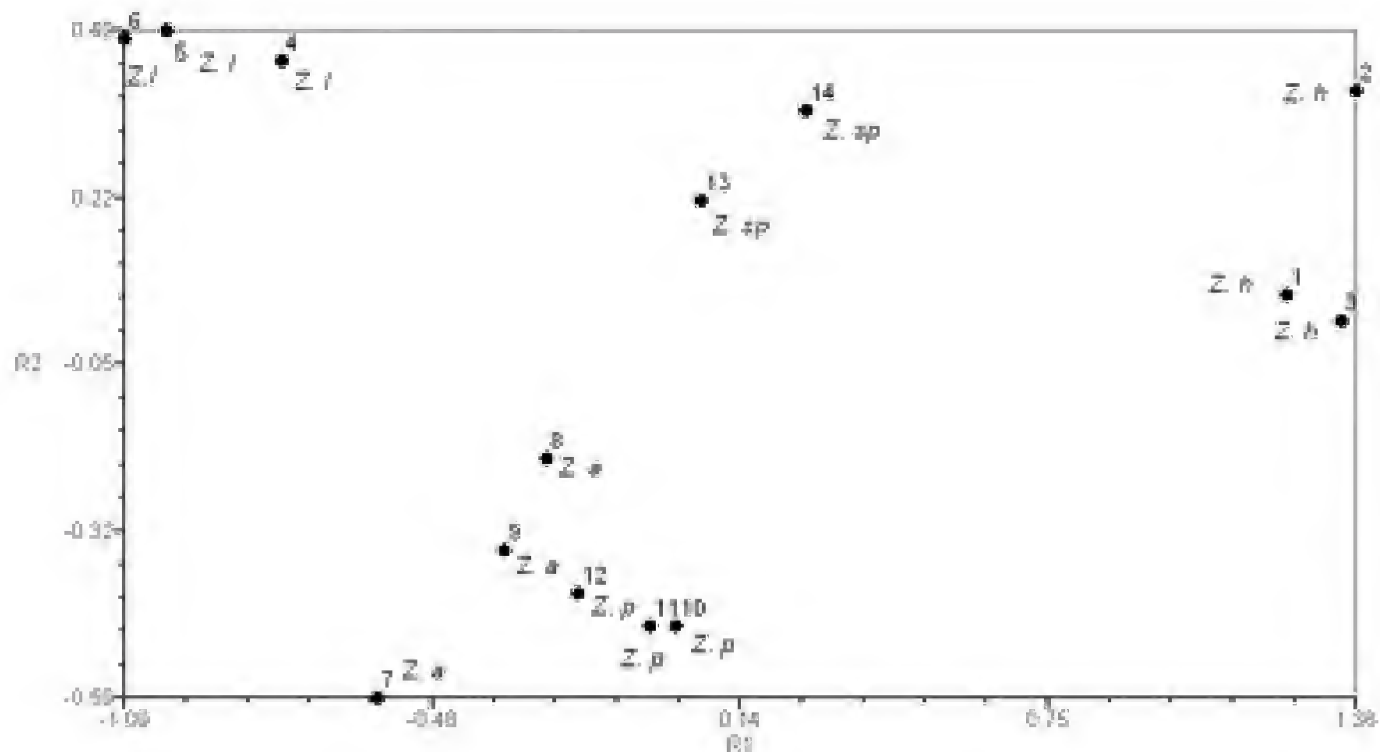


Figura 16. Arreglo espacial de las cinco especies de *Zanthoxylum* generado a través del análisis de Componentes Principales con base los caracteres de la tabla 2. R1 = componente principal uno, R2 = componente principal dos, Z. a = *Z. arborescens*, Z. h = *Z. hidalgense*, Z. l = *Z. liebmannianum*, Z. p = *Z. purpusii*, Z. p = Z. sp.

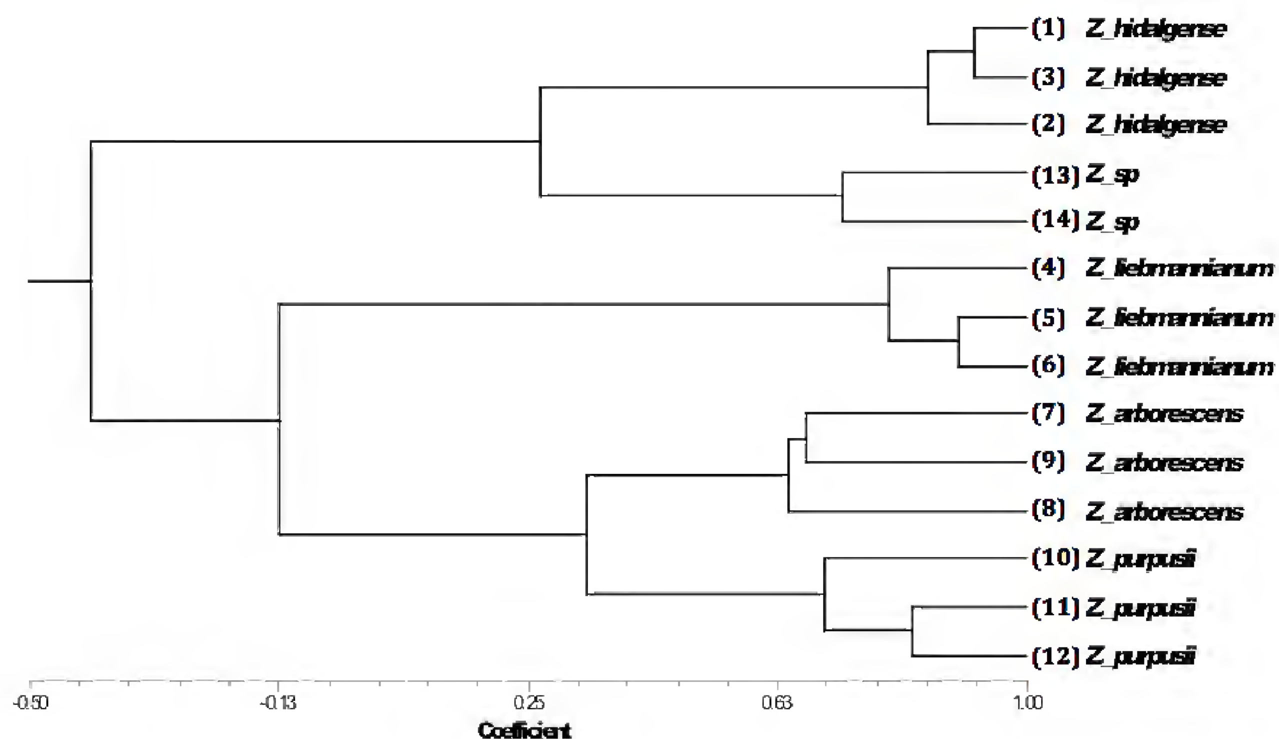


Figura 17. Fenograma para 14 individuos de las cinco especies de *Zanthoxylum* estudiadas, generado con el coeficiente de correlación y el método de agrupamiento UPGMA (por sus siglas en inglés).

Tabla 2. Valores de los eigen-vectores para los tres primeros componentes de los caracteres de la madera de las cinco especies de *Zanthoxylum*. Las variables con valores más altos se indican cono asterisco.

		eingvectores	
Caracteres	*Componente 1*	*Componente 2*	*Componente 3*
Vasos/mm² en la madera tardía	-0,926	-0,087	0,232
Vasos/mm² en la madera temprana	-0,319	0,834	0,442
Diámetro de vasos, madera temprana	0,966*	0,626	0,239
Grosor pared de vasos, madera temprana	0,918*	0,247	-0,264
Diámetro de vasos, madera tardía	0,988*	0,067	0,118
rosor pared de vasos, madera tardía	0,915*	0,137	-0,347
Longitud de elementos de vaso (µm)	-3,111	-0,903*	0,246
Diámetro de punteaduras (µm)	0,961*	-0,055	0,254
Diámetro de fibras (µm)	0,995*	-0,079	0,040
Longitud de fibras (µm)	0,718	-0,571	-0,379
Radios/mm	-0,870	0,401	-0,258
Altura de radios (µm)	0,685	-0,709	0,099
Anchura de radios (µm)	0,741	-0,585	0,285
Número de células de altura en radios	0,925*	-0,264	-0,068
Número de células de anchura en radios	0,896	-0,223	0,329
Tipo de radios	-0,300	-0,628	-0,685*
Drusas	-0,440	-0,888	0,069
Canales verticales traumáticos	-0,204	-0,683	0,094
Parénquima apotraqueal difuso	0,440	0,888	-0,069
Parénquima marginal en bandas	-0,890	-0,052	-0,451
Parénquima paratraqueal escaso	-0,867	-0,301	0,386
Parénquima paratraqueal vasicéntrico	0,867	0,301	-0,386

Carrera y Pérez, 1988; Mendes *et al.,* 1999; León, 2006). Cabe mencionar que *Z. hidalgense* presenta punteaduras de 6,85 µm, valor superior a la amplitud reportada para las otras especies del género previamente estudiadas. Así, también otros autores registran para los elementos de vaso una longitud que fluctúa entre 46 µm y 200 µm (Loureiro *et al*., 1981; Carrera y Pérez, 1988; Mendes *et al.,* 1999; León, 2006). Sin embargo, las cinco especies estudiadas presentan un valor de la media superior para este caracter, (255-385) µm (Tabla 1). Bajaras-Morales *et al.* (1997) encontraron este mismo rango en la longitud de los vasos para *Z. kellermanii.* Asimismo, la longitud de las fibras es mayor para las especies estudiadas en este trabajo.

El género se caracteriza por su porosidad difusa, ya que de 70 especies descritas sólo cinco presentan porosidad anular o semianular (Loureiro *et al*., 1981; Carrera y Pérez, 1988; Reynel, 1995; Bajaras-Morales *et al.,* 1997; Mendes *et al*., 1999; InsideWood, 2004; León, 2006), incrementándose a 10 con las especies estudiadas en este trabajo. La densidad de vasos solitarios en la madera temprana fue más abundante en *Z. liebmannianum* (6/mm²) que en las otras cuatro especies estudiadas y la menor densidad de vasos en la madera tardía se encontró en

Z. hidalgense (8/mm^2), considerándose escasos en comparación con especies de otras familias (Terrazas, 1994). Los radios heterogéneos son comunes en *Zanthoxylum* (Loureiro *et al.*, 1981; Carrera y Pérez, 1988; Reynel, 1995; Bajaras-Morales *et al.,* 1997; Mendes *et al.*, 1999; InsideWood, 2004; León, 2006), aunque se presentan también homogéneos como en *Z. hidalgense* y en *Z. liebmannianum*, este tipo de radios únicamente se habían registrado en otras tres especies del género (InsideWood, 2004). El género se caracteriza por presentar fibras no septadas (Reynel, 1995; InsideWood, 2004). En este trabajo, por primera vez, se registran fibras septadas en *Z. purpusii.* Aguilar-Rodríguez y Terrazas (2001), señalan que las fibras no septadas pueden mantener protoplasto y núcleos vivos con la finalidad de almacenar material de reserva y ser usado en el momento de reiniciar la actividad cambial. Por otro lado también las fibras septadas se consideran como un tipo de células de almacenamiento y los septos son indicadores de longevidad (Carlquist, 1988, 1997). Consideramos que ambos tipos de fibras pueden estar relacionadas con la porosidad semianular de dichas especies y presencia de septos en las fibras de *Z. purpusii* podría ser considerada como una novedad evolutiva.

Los cristales prismáticos están presentes en todas las especies del género (Loureiro *et al.*, 1981; Carrera y Pérez, 1988; Reynel, 1995; Mendes *et al.*, 1999; León, 2006). Los cristales son comunes en la madera de las angiospermas en células radiales, parénquima axial, a veces en fibras (Metcalfe y Chalk, 1983; Carlquist, 1989; Franceschi y Nakata, 2005); la presencia de drusas es rara en los vasos (Espinoza de Pernía, 1987) como ocurre con *Z. arborescens* y *Z. purpusii.* La presencia de estos contenidos está asociada con varias funciones de la planta o con la edad del individuo, así como con el clima y tipo de suelo (Aguilar-Rodríguez y Terrazas, 2001; Franceschi y Nakata, 2005). La presencia de drusas en estas dos especies se puede atribuir al tipo de suelo, ya que ambas especies se colectaron en la misma zona edáfica.

Con respecto al parénquima, el más común fue en bandas, presente en cuatro de las especies estudiadas. Sin embargo, se registraron otros tipos de parénquima, apotraqueal difuso, paratraqueal escaso y vasicéntrico, siendo *Z. arborescens* la especie con mayor diversidad al observarse todos los tipos de parénquima. Esto se encuentra asociado a caracteres evolucionados en las angiospermas (León y Espinoza de Pernía, 1999).

El fenograma y el diagrama de dos dimensiones del análisis de componentes principales mostraron que los individuos de cada especie se agrupan dentro de su respectiva especie con base en la combinación de caracteres de su madera. *Zanthoxylum purpusii*, además se distingue por la presencia de canales traumáticos y sus fibras septadas. Además, el fenograma mostró mayor similitud en la madera entre especies de diferentes secciones que entre secciones. Por ejemplo, en *Z. arborescens* (Sección *Macqueria*) y *Z. purpusii* (Sección *Zanthoxylum*) tienen radios heterogéneos, parénquima paratraqueal escaso y drusas en los vasos. Aunque en el análisis de componentes principales no sea clara la separación de *Z. arborescens* (9) y *Z. purpusii* (12), en el fenograma (Fig. 17) se demuestra la identidad específica entre ellas. Estas dos especies se agrupan con *Z. liebmannianum* (Sección *Pterota*), la presencia de parénquima marginal en bandas y radios biseriados. La especie más disímil de las demás fue *Z. hidalgense* (Sección *Macqueria*), la cual no tiene parénquima marginal en bandas y presenta valores altos para diámetro de

vasos en madera temprana y tardía (95,25 µm y 62,34 µm), grosor de la pared de vasos en madera temprana y tardía (5,85 µm y 5,64 µm), diámetro de punteaduras (6,85 µm), diámetro y longitud de fibras (14,13 µm y 886,81 µm), y altura y anchura de radios (329,03 µm y 40,46 µm). Los grupos revelados en el fenograma tienen muy pocos caracteres únicos que los distinguen, por lo que el estudio de un mayor número de especies de *Zanthoxylum* presentes en México permitirá confirmar la existencia de dos grupos.

Las especies de *Zanthoxylum* presentes en México se distribuyen en diferentes tipos de vegetación y algunas de sus características anatómicas parecen ser adaptaciones a dichos ambientes, como lo sugieren el diámetro y arreglo de los vasos, así como la longitud y diámetro de las fibras. *Zanthoxylum hidalgense* se distribuye en el bosque templado y presenta los vasos de mayor diámetro con fibras más largas y de mayor diámetro. Estos valores son similares a *Z. kellermanii*, que se distribuye en una selva alta perennifolia pero tiene porosidad difusa; mientras que *Z. arborescens* y *Z. liebmannianum*, que se distribuyen en el matorral xerófilo, presentan el menor diámetro de vasos y de longitud y diámetro de fibras y *Z. purpusii*, que se colectó en bosque tropical caducifolio, presenta valores intermedios. Esta última especie, junto con la especie no determinada, tienen la mayor abundancia de parénquima marginal y vasos arreglados en grupos o patrón dendrítico. Carlquist (2001) sugiere que valores del Lf/lev superiores a 2,6 indican especialización hacia ambiente xéricos. Comparado con otras familias, Lf/lev es alto para las cinco especies estudiadas. Sin embargo, una mayor especialización hacia el crecimiento intrusivo se encontró en *Zanthoxylum hidalgense* y en la especie no identificada.

Se concluye que las cinco especies de *Zanthoxylum* estudiadas que se distribuyen en México comparten los caracteres de la madera ya señalados por otros autores que las reconocen dentro del género. Sin embargo, se encontraron caracteres como la presencia de drusas en algunos vasos y las fibras septadas que se registran por primera vez para el género, sugiriendo la necesidad de estudiar un mayor número de especies. La porosidad semianular y el diámetro de los vasos entre otros caracteres parecen ser adaptaciones a los ambientes estacionales (templados o áridos) donde se distribuyen las especies de *Zanthoxylum* en México.

AGRADECIMIENTOS

A la doctora Sombra Patricia Rivas Arancibia, por los análisis estadísticos (Escuela de Biología, BUAP). A los revisores por sus comentarios, en especial al doctor Raymundo Dávalos por su revisión crítica. Al laboratorio de fanerógamas del Instituto de Biología de la UNAM. Al financiamiento PROMEP/1035/08/1641 para el desarrollo del proyecto y por la beca otorgada a la primera autora.

REFERENCIAS

Aguilar-Rodríguez, S. y T. Terrazas. 2001. Anatomía de la madera de *Buddleja* L. (Buddlejaceae): análisis fenético. *Madera y Bosques* 7(2):63-85.

Barajas-Morales, J., A.G. Ángeles y S.P. Solís. 1997. Anatomía de maderas de México: Especies de una selva alta perennifolia. I. Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 125 p.

Barber, C. 1982. On the nature and development of the corky excrescences

on stems of *Zanthoxylum*. Annals of Botany 6:155-166.

Berlyn, G.P. y J.P. Miksche. 1976. Botanical microtechnique and cytochemistry. The Iowa State University Press. Ames, Iowa. 326 p.

Carrera, R. y E. Pérez. 1988. Descripción anatómica de la madera de ocho especies forestales. Revista Forestal Baracoa 18(1):17-37.

Carlquist, S. 1988. Comparative wood anatomy. Systematic, ecological and evolutionary aspects of dicotyledon wood. Springer-Verlag, Berlin. 436 p.

Carlquist, S. 1989. Wood Comparative Anatomy. Springer-Verlag. Nueva York.

Carlquist. S. 1997. Wood Anatomy of Buddlejaceae. Aliso 15(1):41-56.

Carlquist, S. 2001. Comparative wood anatomy. Springer-Verlag, Berlin. 448 p.

Engler, A. 1896. Rutaceae. Nat. Pflanzenfam. III. 4:95-201.

Engler, A. 1931. Rutaceae. *In* A. Engler y K. Prantl (Eds.). Die Naturlichen Pflanzenfamilien, 2a. ed., vol. 19a. Engelmann Leipzing. p: 187-359.

Espinoza de Pernía, N. 1987. Cristales y sílice en la madera de dicotiledóneas de Latinoamérica. Revista Pittieria 15:13-65.

León H. y Espinoza de Pernía. 1999. Parénquima radial disyuntivo y filogenia. Revista Forestal Venezolana 43(2):137-146.

Franceschi, V.R. y P.A. Nakata. 2005. Calcium oxalate in crystals in plants: formation and function. Annual Review of Plant Biology 56:41-71.

IAWA Committee. 1989. List of microscopic features for hardwood identification. IAWA Bulletin new series 10:219-332.

InsideWood. 2004-onwards. En línea www.insidewood.lib.ncsu.edu /search. [07-01-2009].

Judd, W.S., C.S. Campbell, E.A. Kellogg, P.F. Stevens y M.J. Donoghue. 2008. Plant systematics. A phylogenetic approach. 3a. ed. Sinauer Associates. Masachusetts. 611 p.

León, H. 2006. Anatomía de la madera de 13 especies del Orden Sapindales que crecen en el Estado de Mérida, Venezuela. Acta Botánica Venezolana 29:269-296.

Loureiro, A.A., J.F. Vasconcelos y W.P. Albuquerque. 1981. Anatomia do lenho de 4 espécies de *Zanthoxylum* Linnaeus (Rutaceae) da Amazonia. Acta Amazonica 11(4):809-820.

Mendes, L.M., R.M. Silva, P.F. Trugilho y G.A. López. 1999. Anatomia e características Fisico-químicas da madeira de *Zanthoxylum tingoassuiba* St. Hil. de ocorrência na Região de Lavras/M.G. CERNE 5(1):15-25.

Metcalfe, C.R. y L. Chalk. 1983. Anatomy of the Dicotyledons, vol. II. 2a. ed. Clarendon Press. Oxford. 297 p.

Reynel, C. 1995. Systematics of Neotropical *Zanthoxylum* (Rutaceae) with an account on the wood anatomy of the genus. Ph.D. thesis, University of Missouri, St. Louis. 576 p.

Rohlf, F.J. 1998. NTSYS-pc numerical taxonomy and multivariate analysis system. Release 2.02 Exeter Software, Setauket. Nueva York.

Ruzin, E. 1999. Plant microtechnique and microscopy, Oxford University Press. Nueva York. 322 p.

Stace, H.H., J.A. Armstrong y S.H. James. 1993. Cytoevolutionary patterns in Rutaceae. Plant Systematics and Evolution 187: 1-28.

Sneath P.H y R.R. Sokal. 1973. Numerical taxonomy. The principles and practices of numerical classification. W.H. Freeman and Company, San Francisco. 573 p.

Terrazas, S.T. 1994. Wood anatomy of the Anacardiaceae: ecological and phylogenetic interpretation. Tesis doctoral. University of North Carolina of Chapel Hill. 321 p.

APÉNDICE

Especies y secciones de *Zanthoxylum* estudiadas, así como su localización geográfica

Z. arborescens Rose. Sección *Macqueria*. Puebla: 350 m antes de entrar a Chila de las Flores, Acatlán, 17°57'27.1"-97°52'03.2", 1726 msnm, *Arenas-Flores 4, 5, 6, 7* (MEXU). *Z. hidalgense* Lundell, Sección *Macqueria*. Querétaro: Mpio. Landa, camino hacia Agua Zarca a 6 km del entronque del Lobo, 21°16'24.9"-99°06'29.3", 1850 msnm, *Arenas-Flores 15, 16, 17, 18, 19* (MEXU). *Z. liebmannianum* (Engl.) P. Wilson, Sección *Pterota*. Puebla: junto a la estación de microondas carretera Tecamachalco–Tehuacán, 18°34'45.7"-97°34'50.0", 1879 msnm, *Arenas-Flores 1, 2, 3* (MEXU). *Z. purpusii* Brandegee, Sección *Zanthoxylum*. Puebla: 5 km, saliendo de Acatlán hacia Izúcar de Matamoros, 18°11'43.6"-98°08'30.1", 1750 msnm, *Arenas-Flores 8, 9, 10* (MEXU). *Z.* sp. Puebla: cerro del Tenzo, antes de San Juan Atzompa, 18°44'6.3"-97°58'0.9",1909 msnm, *Andrés-Hernández 111, 112* (MEXU).

Manuscrito recibido el 11 de agosto de 2010.
Aceptado el 1 de diciembre de 2011.

Este documento se debe citar como: Arenas Flores, F., A.R. Andrés-Hernández, T. Terrazas y C. Castañeda. La madera de cinco especies de *Zanthoxylum* L. (Rutaceae) con distribución en México. *Madera y Bosques* 18(1):43-56.

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

El impacto del huracán Dean sobre la estructura y composición arbórea de un bosque manejado en Quintana Roo, México

The impact of the hurricane Dean on the structure and arboreal composition of a managed forest in Quintana Roo, Mexico

Angélica Navarro-Martínez[1*], Rafael Durán-García[2]
y Martha Méndez-González[2]

RESUMEN

Los huracanes son considerados como uno de los factores más determinantes de la estructura y composición de muchos bosques tropicales. En Quintana Roo, estos fenómenos naturales son tan frecuentes que forman parte de la dinámica natural del bosque. El 21 de agosto de 2007, en el centro-sur del Estado, ocurrió el huracán Dean, que afectó alrededor de 900 000 ha de la selva mediana subperennifolia. En este estudio se cuantifican los daños ocasionados sobre la vegetación y se analizan los cambios en la composición de especies y la estructura del bosque afectado por el huracán Dean. Se encontró que la composición del bosque no fue afectada significativamente y que el mayor efecto del huracán fue sobre la estructura del bosque. Los árboles más dañados fueron individuos de especies del sotobosque. Los principales tipos de daño fueron desramado, desenraizado y quebrado o ruptura del tronco. Asimismo, basados en fuentes bibliográficas y algunas observaciones durante el trabajo en campo, se discute el efecto que el aprovechamiento forestal puede tener en cuanto a incrementar la susceptibilidad de estos bosques al daño por viento. Se propone disminuir la cantidad de áreas de concentración de madera (bacadillas) durante la extracción forestal, así como incorporar a los planes de manejo forestal, el aprovechamiento de árboles dañados que ofrezcan alguna utilidad. También se propone el monitoreo a largo plazo de la dinámica de los bosques afectados en relación con los no afectados por huracanes.

PALABRAS CLAVE:
Composición y estructura arbórea, índice de valor de importancia, Selva mediana subperennifolia.

ABSTRACT

Hurricanes are considered among the most important determinants of the structure and composition of many tropical forests. In Quintana Roo, these natural phenomena are part of the natural dynamics of the forest. Hurricane Dean, on of the most recent of these weather events occurred on August 21, 2007, affecting around 900 000 ha of medium semi-evergreen forest. The damage occurred on the

1* Autor para correspondencia; El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Chetumal, Av. Centenario, km. 5.5, CP 77014, Chetumal, Quintana Roo, México. c.e.: manava@ecosur.mx

2 Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C., Calle 43, núm. 130, col. Chuburná de Hidalgo, CP 97200, Mérida, Yucatán, México. c.e.: rduran@cicy.mx, mar@cicy.mx

vegetation was quantified and changes in species composition and structure of the forest affected by Hurricane Dean were discussed. It was found that the composition of the forest was not affected. The greatest effect of the hurricane was on the forest structure. Understory trees was more damaged that canopy trees. The main types of damage were the small and medium branch damage, uprooted and snapped trees. Forest management could have increase the susceptibility of this forest to wind damage. The effects of forest management in the susceptibility of the forest are discussed based on bibliographic information and some observations during field sampling. It is proposed to reduce the number of "wood concentration" during logging activity, as well as to incorporate to management plans, the extraction of damaged trees. It is also proposed to monitor the long-term dynamics both of damaged and undamaged forest by hurricanes.

KEY WORDS:
Tree composition and structure, Importance valor Index, medium semi-evergreen forest.

INTRODUCCIÓN

Uno de los agentes de disturbio más frecuentes e importantes en los bosques tropicales son los huracanes, los cuales pueden alterar, en poco tiempo, la estructura y la dinámica de las comunidades y de las poblaciones vegetales y animales que en ellos habitan, así como diversos procesos de los ecosistemas (Pickett y White, 1985; Lugo, 2000). El disturbio producido por un huracán afecta la dinámica natural de los ecosistemas al provocar un incremento en las tasas de mortalidad, reclutamiento y crecimiento de las poblaciones que los componen y, en consecuencia, pueden modificar su composición y estructura (Sousa, 1984; Vester y Olmsted, 2000), y alterar los procesos de acumulación y descomposición de biomasa (Harmon *et al.*, 1991; Whigham *et al.*, 1991). El impacto de estos disturbios está fuertemente influenciado, tanto por las características de la vegetación antes del disturbio (composición y tamaño de los árboles), como por la velocidad del viento y la cantidad de precipitación, además de la topografía del lugar y la existencia de aperturas en el dosel (Everham y Brokaw, 1996; Vester y Olmsted, 2000; Chazdon, 2003). A nivel individual, los efectos del huracán pueden depender de las características propias de la especie, como la arquitectura del árbol (incluyendo la profundidad y amplitud de sus raíces), la densidad de su madera, su tamaño, su grado de adaptación a la ocurrencia de estos fenómenos, así como de la fisonomía del parche donde crece el árbol; esto último puede ser modificado por las prácticas de manejo forestal (Rivas *et al.*, 2000; Zeng *et al.*, 2004, 2007; Harcombe *et al.*, 2009).

Por su ubicación, la Península de Yucatán es afectada de forma directa o indirecta por muchos de los huracanes que se forman en el Caribe Occidental. Se ha estimado que durante el periodo de 1871 a 1999, de los 154 ciclones que se formaron en el Océano Atlántico y el Caribe, 45.3% han tocado tierras quintanarroenses (Hernández *et al.*, 2001). El huracán Gilberto (en 1988) y el huracán Wilma (en 2005) afectaron severamente la región norte del estado, en tanto que el Roxana (en1995) y más recientemente el Dean (en 2007) pasaron por el sur de la península tocando tierra a la altura de Sian Ka'an y, en Campeche, por Calakmul, provocando importantes daños materiales en las zonas urbanas, la agricultura y los ecosistemas.

El huracán Dean, de categoría 5 en la escala de Saffir-Simpson, tocó tierra quintanarroense el 21 de agosto de 2007, con vientos sostenidos hasta de 270 km/h, afectando una superficie de 917,935 ha de selva mediana subperennifolia (26,2% de la superficie forestal estatal) (Gobierno del Estado de Quin-

tana Roo, 2007), en consecuencia se vio afectado el hábitat de una gran diversidad de plantas y animales, algunas de ellas endémicas de la Península de Yucatán y otras bajo alguna categoría de riesgo. Dichos ecosistemas presentan una larga historia de aprovechamiento forestal, de alrededor de 300 años (Navarro, 2011), siendo la caoba (*Swietenia macrophylla* King) la especie más aprovechada. Aunque la literatura sobre los efectos de huracanes en la vegetación de los bosques tropicales es extensa, estos aspectos han sido poco estudiados para la región de estudio, a pesar de la alta ocurrencia de huracanes (Whigham *et al*., 1991; Sánchez e Islebe, 1999; Vester y Olmsted, 2000; Dickinson *et al*., 2001; Garrido *et al*., 2008; Vandecar *et al*., 2011). Estos aspectos son importantes de considerar porque el aprovechamiento forestal puede incrementar la vulnerabilidad de la selva a los efectos del viento por el aumento en el número y tamaño de los claros y los cambios en la densidad de individuos de las especies extraídas, contar con dicho conocimiento permitiría hacer sugerencias para la mejor planeación de las prácticas de manejo forestal.

OBJETIVOS

El objetivo principal de este estudio fue evaluar los efectos del huracán Dean sobre la estructura y composición de especies arbóreas en un bosque tropical bajo manejo forestal en la zona centro-sur del estado de Quintana Roo. Dado que se contaba con información previa al impacto del huracán, se pudieron analizar los cambios en la composición de especies arbóreas y en la estructura del bosque afectado por el huracán Dean. Además, se evaluó el efecto del manejo forestal sobre la susceptibilidad del bosque ante el impacto de huracán, con base en información bibliográfica disponible y algunas observaciones durante el trabajo de campo.

METODOLOGÍA

Área de estudio

El presente estudio se llevó a cabo en el ejido Xhazil Sur, localizado dentro del área de influencia de la Reserva de la Biosfera Sian Ka'an, en el Corredor Biológico Mesoamericano-México, entre los paralelos 19°13'07" y 19°30'36" de latitud norte y los 87°52'40" y 88°06'55" de longitud oeste, en el estado de Quintana Roo (Fig. 1). Xhazil Sur es uno de los ejidos forestales más grandes e importantes de la Zona Maya quintanarroense, ocupa una superficie total de 54 441 ha (RAN-INEGI, 1998), de las cuales 25 000 ha (46%) corresponden al área forestal permanente (área bajo manejo forestal). En esta superficie, la vegetación dominante es la selva mediana subperennifolia (Miranda, 1978), la cual alberga una enorme diversidad de plantas y animales. El bosque en la región alcanza una altura de 24 m y contiene alrededor de 100 especies de árboles, siendo las más abundantes *Manilkara zapota* (L.) P. Royen, *Brosimum alicastrum* Sw. y *Bursera simaruba* (L.) Sarg. (Vester *et al*., 2005). El clima es del tipo Aw(x')i, cálido sub-húmedo con lluvias en verano y parte del invierno (García, 1987). La temperatura y la precipitación promedio anual son de 26 °C y 1234 mm, respectivamente. Los suelos que predominan, de acuerdo con la clasificación maya, son: tzek'kel (litosol y rendzina), ak'alche (gleysol), ya'ax hom (vertisol) (Sánchez-Sánchez e Islebe, 2002).

Anualmente, estos bosques están expuestos a la incidencia e impacto de tormentas tropicales y huracanes, los cuales juegan un papel importante en la dinámica del bosque, Sin embargo, se

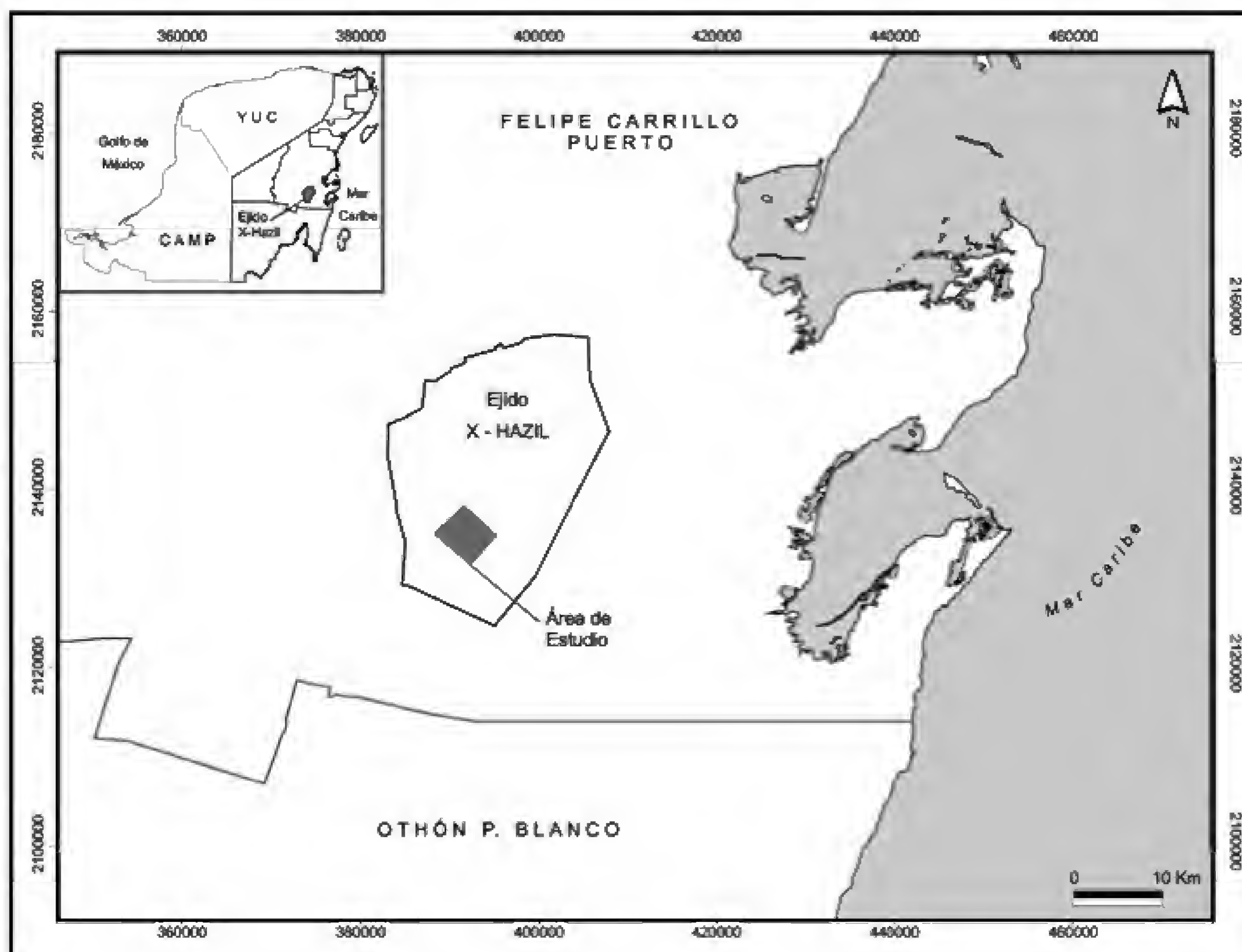


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

considera que estos bosques han desarrollado una resiliencia elevada, ya que han logrado adaptarse a una historia de por lo menos 3000 años de impactos frecuentes de huracanes (Whigham *et al.*, 1991), incendios forestales y actividades humanas (Turner, 1978). Además, en esta región, el bosque es cosechado selectivamente a una baja intensidad (1 m^3/ha en promedio). La cosecha se realiza en el Área Forestal Permanente del ejido, la cual es manejada para la producción de madera y otros productos forestales. El manejo forestal se lleva a cabo por las propias comunidades bajo un plan de manejo basado en el inventario de árboles mayores de 10 cm de diámetro a la altura del pecho (dap1,3 m del suelo) de todas las especies para determinar niveles de cosecha sustentable.

En el área de estudio, el huracán Dean pasó siendo de categoría 4 en la escala de Saffir-Simpson, con una velocidad del viento de 210 km/h a 249 km/h (Rogan *et al.*, 2011); en tanto que la precipitación alcanzó un valor de 81 mm durante las primeras 48 horas (Hernández, s/a).

Evaluación del daño

Durante 2003 y 2004 se establecieron ocho parcelas de una hectárea (500 x 20 m) distribuidas al azar, dentro del área forestal permanente del ejido Xhazil Sur,

con la finalidad de conocer las etapas de desarrollo del bosque, así como determinar la estructura y composición de la selva mediana subperennifolia en este ejido. Tras el paso del huracán Dean, que fue en agosto del 2007, entre enero y febrero de 2008 se evaluó en estas ocho parcelas el daño ocasionado por este fenómeno sobre el arbolado mayor o igual a 10 cm de dap. En cada parcela se identificaron las especies y se midió el dap y la altura total de cada individuo. El tipo de daño experimentado por cada individuo fue determinado de acuerdo con la clasificación siguiente: 1) desenraizado (derribado con exposición de raíces), 2) descopado (sin ramas desde la base de la copa), 3) desramado (ramas secundarias quebradas), 4) quebrado (tronco quebrado), 5) inclinado (sin exposición de raíces), 6) doblado, 0) sin daño. Además, se anotaron los árboles que se observaron muertos en pie después del huracán. Cuando el tronco se quebró (categoría 4), se tomó la altura a la cual se ocasionó el daño. Cuando los árboles fueron derribados sólo se les midió el dap. Para facilitar el análisis y hacer comparables los resultados con otros estudios en la región, se agruparon las clases de daño en tres grupos principales: 1) daño ligero (clase 0 + clase 3), 2) daño moderado (clase 5 + clase 6) y 3) daño severo (clase 1 + clase 2 + clase 4).

Cambios en la composición y estructura del bosque

Debido a que se contaba con información previa al huracán para el arbolado grande (dap > 30 cm), en las mismas parcelas, se analizaron los cambios ocurridos en la estructura y composición del bosque. Se calculó además la riqueza de especies, densidad e índices de valor de importancia y la diversidad pre y post-huracán. Para calcular el valor de importancia se empleó el Índice de Valor de Importancia: IVI = densidad relativa + dominancia relativa + frecuencia relativa (Mueller-Dombois & Ellenberg, 1974). La diversidad fue calculada mediante el Índice de Shannon (Magurran, 2004), usando del programa EstimateS 8. 2.0. La equitatividad fue obtenida mediante la ecuación

$$E = \frac{H^1}{\log(n)}$$

donde H' es el índice de diversidad de Shannon-Wienner y n es el número total de individuos (Magurran, 2004). Para evaluar el efecto del huracán sobre la estructura del bosque se realizó una prueba T para muestras pareadas para un factor (huracán) con dos niveles (antes y después), mediante el uso del programa SPSS versión 16.

RESULTADOS

Evaluación del daño

Se registraron un total de 1486 árboles mayores a 10 cm de dap, pertenecientes a 71 especies, 59 géneros y 32 familias. De estos árboles, 37 (2,4%) resultaron muertos después del huracán, pero debido a que éstos habían sido registrados como "moribundos" en el censo prehuracán, no se incluyeron en el análisis. Del arbolado muestreado, 88,3% presentó algún tipo de daño, siendo los más comunes el desramado (28,9%), el desenraizado (24,7%) y el quebrado (22,4%) (Fig. 2). De las especies más abundantes, las más afectadas fueron *Pouteria reticulata* (Engl.) Eyma, *Exothea paniculata* (Juss.) Radlk. y *Gymnanthes lucida* Sw., con alrededor de 80% de los árboles de estas especies severamente dañados (Tabla 1). Estas especies, son típicas del sotobosque y generalmente no alcanzan grandes tallas dentro del bosque, al menos en el área de estudio.

Tabla 1. Variación en el tamaño promedio de los árboles y el porcentaje de daño ocasionado por el huracán Dean en las 12 especies más abundantes del ejido Xhazil Sur, Quintana Roo. AB = Área basal; dap = Diámetro a la altura del pecho. La clasificación de daño se refiere a la intensidad de daño más que a un porcentaje, como se indica enseguida: 1) daño ligero (clase 0 + clase 3), 2) daño moderado (clase 5 + clase 6) y 3) daño severo (clase 1 + clase 2 + clase 4). En el texto se describe cada clase de 0 a 6.

Especie	*N*	*dap max (cm)*	*dap promedio (cm)*	*AB (m^2/ha)*	*Ligero*	*Moderado*	*Severo*
Todos los individuos	1449	93,5	28,9	123,0	40,6	8,1	51,3
Especies más abundantes	1120	93,5	30,4	93,1	43,7	6,9	49,4
Especies poco abundantes	466	73,5	25,7	30,1	30,5	10,3	59,2
Manilkara zapota	287	92	36,1	35,5	53,7	4,2	42,2
Bursera simaruba	146	80,5	30,3	11,8	59,6	4,1	36,3
Pouteria reticulata	99	32,5	18,5	2,9	7,1	10,1	82,8
Caesalpinia gaumeri	93	93,5	37,1	11,9	41,9	0,0	58,1
Gymnanthes lucida	78	30,5	13,7	1,2	9,0	11,5	79,5
Ottoschulzia pallida	69	77	28,5	5,4	49,3	5,8	44,9
Vitex gaumeri	64	83,2	41,7	9,9	73,4	4,7	21,9
Brosimum alicastrum	42	60,8	34,6	4,2	57,1	4,8	38,1
Metopium brownei	38	50	29,1	3,1	42,1	18,4	39,5
Exothea paniculata	37	40	19,3	1,3	13,5	5,4	81,1
Swartzia cubensis	35	69,5	39,3	4,9	65,7	5,7	28,6
Lonchocarpus xuul	32	35,2	17,2	0,8	9,4	40,6	50,0

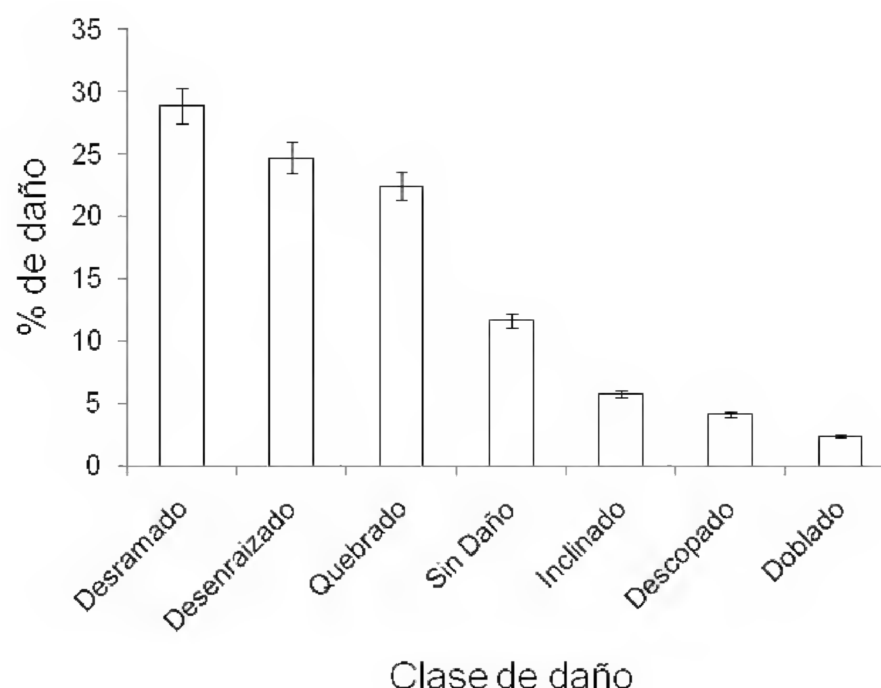


Figura 2. Daños ocasionados al arbolado mayor a 10 cm de dap por el huracán Dean en el bosque manejado de Xhazil Sur, Quintana Roo. N = 1449.

De las especies comerciales, *M. zapota*, *B. simaruba* y *Metopium brownei* (Jacq.) Urb. también tuvieron un porcentaje importante de árboles severamente dañados, mayor a 35%. Sin embargo, *Swietenia macrophylla*, la caoba, especie guía en los aprovechamientos forestales, resultó altamente resistente a los vientos huracanados, ya que de los once árboles encontrados en el área de estudio, la mayor parte (54,5%), sólo sufrió el rompimiento de ramas pequeñas y medianas, únicamente dos árboles (18%) fueron derribados y sólo un árbol pequeño (dap < 30 cm) se quebró.

Al relacionar la clase de daño con el tamaño de los individuos se encontró que el total de los árboles pequeños (dap < 30 cm) sufrieron algún tipo de daño; mientras que de los árboles grandes (dap > 30 cm), 22,1% no presentó daño alguno. De los árboles pequeños la mayor proporción de individuos fue desenraizada (41% de los árboles en promedio) y quebrada (34% de los árboles en promedio); mientras que los árboles grandes sufrieron principalmente el rompimiento de ramas pequeñas y medianas (45% de los árboles en promedio) (Fig. 3). De los árboles grandes, *Caesalpinia gaumeri* Greenm. (32%), *M. zapota* (14,4%) y *Swartzia cubensis* (Britton & P. Wilson) Standl. (10%), presentaron los porcentajes más altos de árboles quebrados. En tanto que *Pseudobombax ellipticum* (Kunth) Dugand (20%), *B. simaruba* (8,4%) y *M. zapota* (6,4%), fueron las especies con mayor proporción de individuos desenraizados.

Cambios en la composición y estructura del bosque

Antes del huracán se registró un total de 788 árboles grandes (> 30 cm de dap) pertenecientes a 50 especies, 39 géneros y 24 familias. Después del huracán, el número de individuos en esta categoría disminuyó a 756, lo cual representa una pérdida de 4,1 % en el número de individuos; sin embargo, la riqueza de especies prácticamente se mantuvo igual.

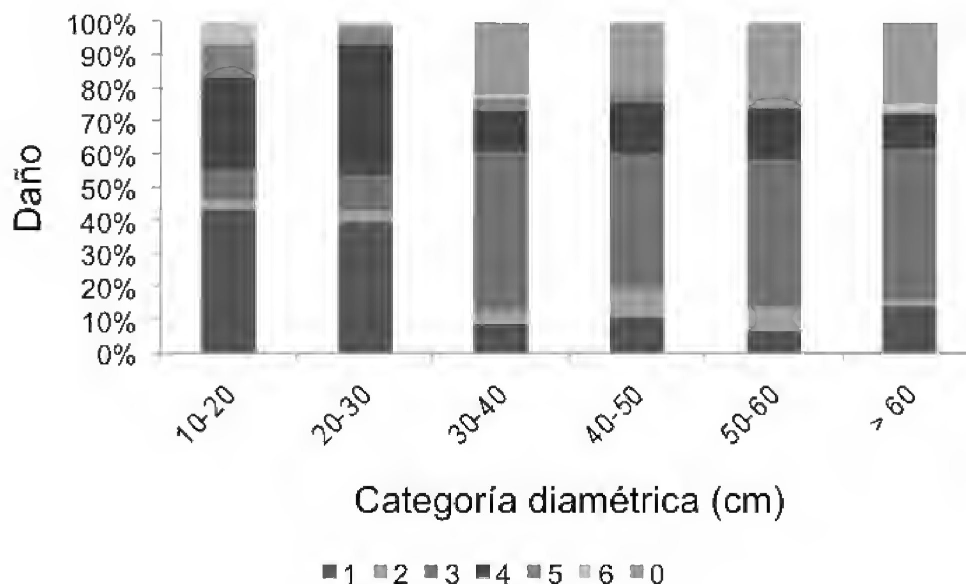


Figura 3. Porcentaje de individuos dentro de cada clase de daño en la vegetación de Xhazil Sur, Quintana Roo. 0) sin daño, 1) Desenraizado, 2) descopado, 3) desramado, 4) quebrado, 5) inclinado, 6) doblado.

Únicamente en dos de las ocho parcelas analizadas se perdieron algunas especies, entre ellas *Luehea speciosa* Willd., el tusuk che y el sak away (dos especies no identificadas), de las cuales sólo se encontró un individuo en el área de estudio durante el muestreo previo al huracán. Los valores del índice de Shannon (H'), por unidad de muestreo, fueron iguales antes y después del huracán, indicando que tampoco se observó algún efecto de Dean sobre la diversidad de la comunidad (Tabla 2). Tampoco hubo efecto significativo del huracán sobre la estructura de la comunidad, aunque ésta sufrió una disminución de 16,2% en la altura promedio ($P < 0,05$; $F = 15,403$) y de 4,5% para el área basal total ($P < 0,05$; $F = 4,935$) (Tabla 2, Fig. 4), pero los mayores daños fueron en los árboles pequeños.

Dominancia de árboles grandes

El análisis de dominancia indicó que la comunidad se encuentra dominada por *M. zapota*, especie que presentó un Índice de Valor de Importancia (IVI) mayor a 60, tanto antes como después del huracán; le siguen en orden de importancia *Bursera simaruba* y *Caesalpinia gaumeri* (Fig. 5). De las 15 especies incluidas en el análisis, nueve incrementaron su importancia después del huracán (Tabla 3): *M. zapota*, *B. simaruba*, *C. gaumeri*, *Swartzia cubenzis*, *Brosimum alicastrum*, *Coccoloba spicata* Lundell, *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth., *Simira salvadorensis* Standl. y *Swietenia macrophylla*; mientras que para *Metopium brownei* y *P. ellipticum*, disminuyó su valor de importancia en la comunidad. La mayoría de las especies conservó su orden de importancia. Sin embargo, *M. brownei* sustituyó en importancia a *P. ellipticum*; a su vez, *L. latisiliquum* y *S. salvadorensis* sustituyeron a *Piscidia piscipula* (L.) Sarg. después del huracán. Para las cuatro especies más importantes, la mayor contribución al IVI estuvo dada por el área basal (dominancia relativa) y la abundancia, tanto antes como después del huracán. Para el resto de las especies, la frecuencia contribuyó más al IVI, sobre todo después del huracán (Fig. 5).

Tabla 2. Parámetros estructurales y comunitarios de un bosque manejado antes y después del huracán Dean. P = Parcela, D = Densidad (ind/ha), S = riqueza de especies, AB = Área basal, DAP = Diámetro a la altura del pecho promedio, AP = Altura Promedio, H = Índice de Diversidad de Shannon, E =Equitatividad.

	Pre-huracán							*Post-huracán*						
P	*D*	*S*	*AB* *(m²/ha)*	*DAP* *(cm)*	*AP* *(m)*	*H*	*E*	*D*	*S*	*AB* *(m²/ha)*	*DAP* *(cm)*	*AP* *(m)*	*H*	*E*
1	101	21	14,5	41,4	15,3	2,52 ± 0,22	0,83	96	21	14,2	40,0	12,8	2,52 ± 0,22	0,83
2	110	20	16,4	41,6	15,9	2,68 ± 0,17	0,89	106	20	15,1	39,7	13,4	2,68 ± 0,17	0,89
3	106	23	15,4	41,4	16,4	2,77 ± 0,13	0,88	100	21	14,0	38,5	13,8	2,77 ± 0,13	0,91
4	121	28	17,5	41,5	18,2	2,80 ± 0,11	0,84	114	28	16,3	38,8	12,4	2,80 ± 0,11	0,84
5	88	20	12,6	41,6	11,7	2,83 ± 0,10	0,89	83	19	12,1	39,5	10,9	2,83 ± 0,10	0,96
6	87	21	13,2	42,8	12,2	2,83 ± 0,07	0,93	87	21	13,4	42,8	12,3	2,83 ± 0,07	0,93
7	102	27	11,8	37,5	14,5	2,85 ± 0,05	0,86	98	27	11,3	36,0	11,7	2,85 ± 0,05	0,86
8	73	21	8,3	37,3	15,4	2,85 ± 0,00	0,94	72	21	8,2	36,9	13,0	2,85 ± 0,00	0,94

Tabla 3. Valor de Importancia para las especies más abundantes en el bosque tropical de Xhazil Sur, Quintana Roo, antes y después del huracán Dean. AR = Abundancia relativa, FR = Frecuencia Relativa, Dominancia Relativa, IVI = Índice de Valor de Importancia.

		Pre-huracán				*Post-huracán*			
	Familia	*AR.*	*FR*	*DR.*	*IVI*	*AR.*	*FR*	*DR*	*IVI*
Manilkara zapota	Sapotaceae	26,8	4,4	31,2	62,4	26,7	4,5	31,3	62,6
Bursera simaruba	Burseraceae	12,3	4,4	9,4	26,1	12,6	4,5	9,7	26,8
Caesalpinia gaumeri	Fabaceae	8,9	3,9	10,2	22,9	9,1	4,0	10,8	23,9
Vitex gaumeri	Verbenaceae	7,4	4,4	9,1	20,9	7,5	4,0	9,4	20,9
Swartzia cubensis	Fabaceae	4,1	4,4	4,6	13,0	4,0	4,5	4,6	13,1
Ottoschulzia pallida	Icacinaceae	4,3	4,4	4,1	12,9	4,2	4,5	4,1	12,9
Brosimum alicastrum	Moraceae	4,3	3,9	3,6	11,8	4,5	4,0	3,7	12,2
Pseudobombax ellipticum	Bombacaceae	2,8	4,4	3,4	10,6	2,6	3,4	2,8	8,9
Metopium brownei	Anacardiaceae	3,6	3,3	3,2	10,1	3,4	3,4	2,8	9,7
Coccoloba spicata	Polygonaceae	2,5	3,3	2,7	8,6	2,6	4,5	3,0	10,2
Psidium sartorianum	Myrthaceae	1,8	3,9	1,3	7,0	1,9	2,8	1,2	5,9
Lysiloma latisiliquum	Fabaceae	1,8	3,3	1,8	6,9	1,9	4,0	1,4	7,2
Simira salvadorensis	Fabaceae	2,0	3,3	1,4	6,7	1,9	3,4	1,9	7,1
Piscidia piscipula	Fabaceae	1,5	3,3	1,4	6,2	1,5	3,4	1,3	6,2
Swietenia macrophylla	Meliaceae	1,3	2,2	1,4	4,9	1,3	2,3	1,5	5,1

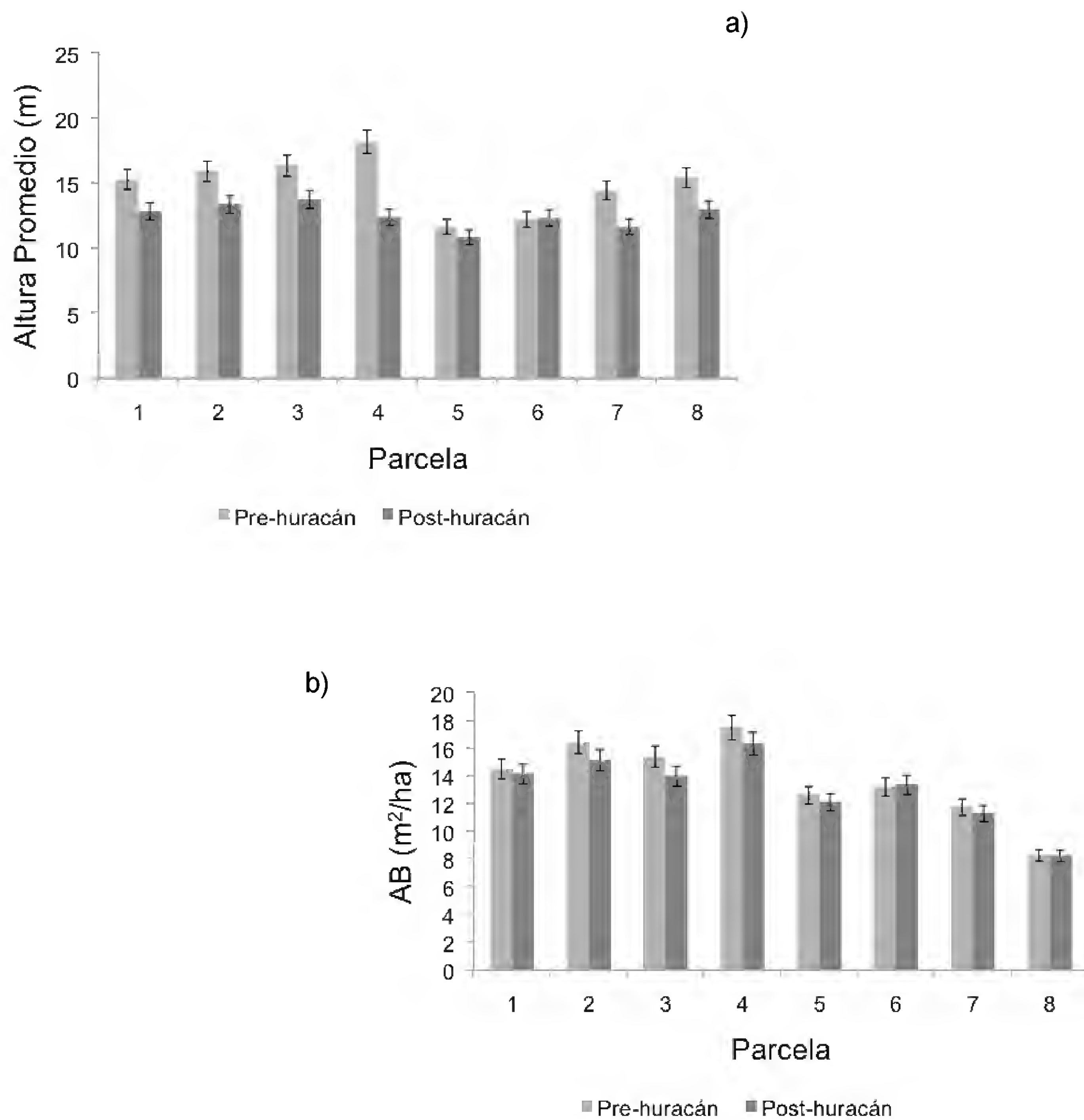


Figura 4. Altura promedio a) y área basal total b) de la vegetación en el ejido Xhazil Sur, Quintana Roo, antes y después del paso del huracán por el estado de Quintana Roo. Los números en el eje de las *x* se refieren a las parcelas de muestreo.

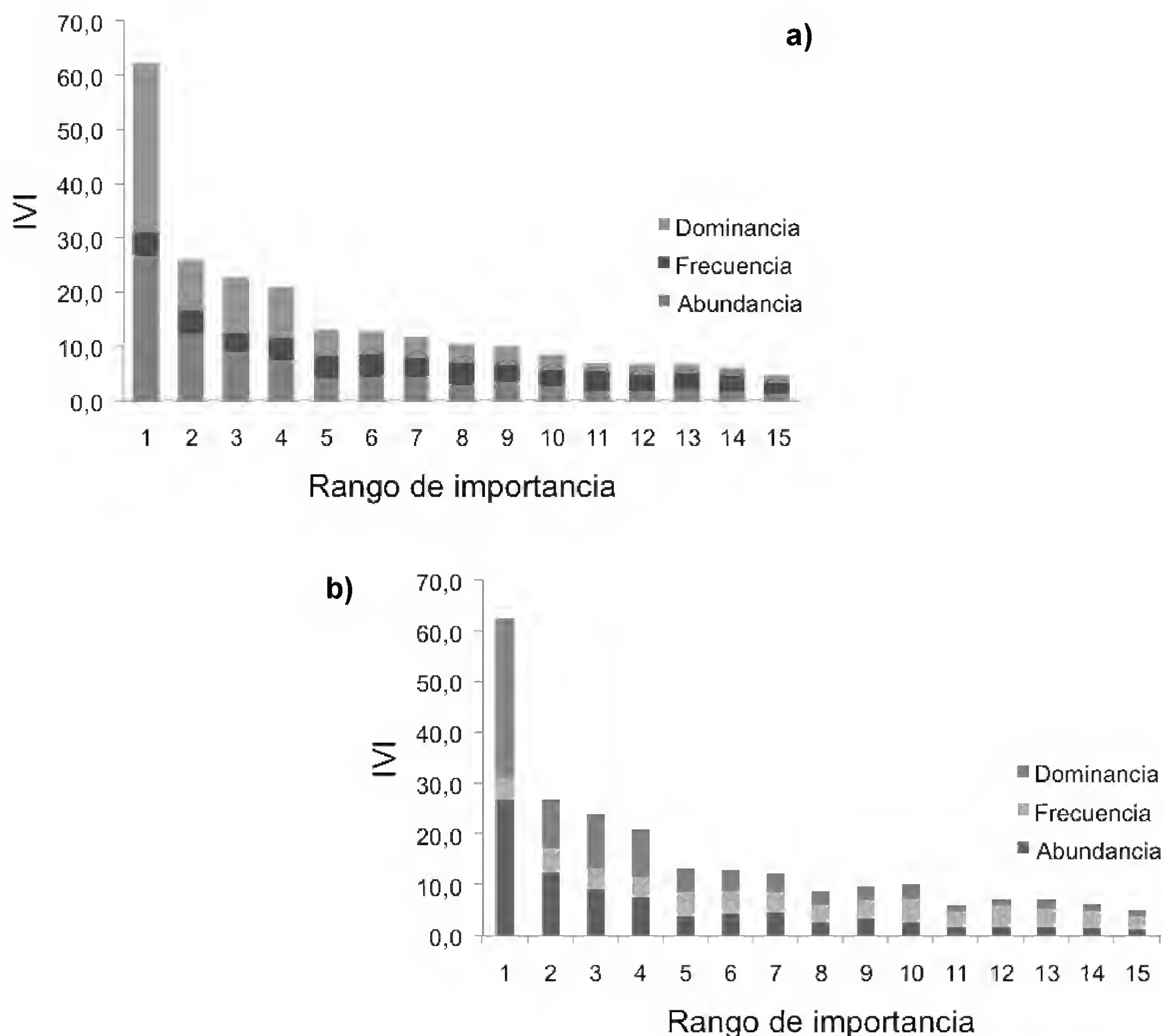


Figura 5. IVI para las especies más abundantes y algunas especies con importancia comercial. a) antes del huracán y b) después del huracán. 1 = *M. zapota*, 2= *B. simaruba*, 3) *C. gaumeri*, 4) *V. gaumeri*, 5) *S. cubensis*, 6) *O. pallida*, 7) *B. alicastrum*, 8) *P. ellipticum*, 9) *M. brownei*, 10) *C. spicata*, 11) *P. sartorianum* 12) *L. latisiliquum*, 13) *S. salvadorensis*, 14) *P. piscipula y* 15) *S. macrophylla.*

DISCUSIÓN

Evaluación del daño

Aunque el huracán Dean ha sido considerado uno de los más severos ocurridos en la región, afectó poco la composición del bosque y la abundancia de las especies en el área de estudio, tal como ha sido documentado para otros bosques tanto tropicales como templados (Boucher, 1990; Whigham *et al.*, 2003; Xi *et al.*, 2008). Los mayores efectos fueron sobre las características estructurales del bosque, dada la alta proporción de árboles desenraizados y quebrados sobre todo en árboles pequeños (dap < 30 cm). Este mismo patrón ha sido observado en el bosque tropical de Puerto Rico estudiado por Zimmerman *et al.* (1994), quienes encontraron que el derribo y la ruptura del tallo fueron los principales daños ocasionados por el huracán Hugo. Para un bosque similar al norte del área

de estudio, Sánchez e Islebe (1999) hallaron que la mayoría de los árboles pequeños resultaron derribados y quebrados por el huracán Gilberto, cuya categoría según la escala de Saffir-Simpson fue la misma que la de Dean.

El porcentaje de árboles dañados encontrado en este estudio es superior a lo que encontraron otros autores para el mismo huracán y otros de la misma intensidad ocurridos en la región (Bellingham *et al.*, 1992; Vester y Olmsted, 2000; Whigham *et al.,* 2003; Vandecar *et al.*, 2011). En todos estos casos, las clases de daño más comunes fueron el desramado, desenraizado y la fractura de tallos a alturas variables; aunque la importancia relativa de los árboles desenraizados y quebrados varió entre los sitios. Por ejemplo, a diferencia de los resultados del presente estudio, Vandercar *et al.* (2011) encontraron que la proporción de árboles quebrados fue mayor que la de árboles desenraizados. Esta diferencia probablemente se deba al tipo de vegetación muestreada en ambos estudios. Al parecer, Vandercar *et al.* (2011) estudiaron el efecto de Dean principalmente en bosques secundarios jóvenes; mientras que en este estudio se evaluó el efecto de Dean sobre la vegetación madura.

Contrario a lo encontrado por otros autores (Putz *et al.*, 1983; Walker, 1991; Yuo y Petty, 1991), los resultados de este estudio muestran que los árboles pequeños fueron más afectados que los árboles grandes, al sufrir la fractura y el desenraizado del tronco; mientras que los árboles grandes, con excepción de *M. zapota*, *B. simaruba* y *M. brownei*, sólo presentaron daños ligeros. Este comportamiento puede deberse a que el aprovechamiento forestal selectivo realizado en el área de estudio abre claros pequeños en el dosel, lo que incrementa la susceptibilidad de los árboles jóvenes al permitir el paso de los vientos huracanados hacia el sotobosque. Esto concuerda con lo encontrado por Putz y Sharitz (1991) y Frangi y Lugo (1991), quienes observaron un daño más severo en los árboles del sotobosque que en los árboles grandes. Putz y Sharitz (1991) concluyen planteando que este hecho puede ser la respuesta del bosque a las condiciones del rodal y la historia de aprovechamiento realizado en su sitio de estudio.

Por otro lado, la mayor proporción de árboles quebrados en *M. zapota* probablemente es debida a la debilidad de los árboles ocasionada por las prácticas de cosecha de la resina para la fabricación de chicle (obs. pers.). Asimismo, para esta especie se observó una alta proporción de árboles desenraizados (Tabla 1), cuya causa probable es la escasa superficie ocupada por las raíces de estos árboles y lo somero de las mismas, además de que esta especie generalmente no forma grandes contrafuertes.

Cambios en la composición y estructura del bosque

El decremento en la altura promedio de los árboles después del huracán es superior a los valores publicados por Sánchez e Islebe (1999) para un bosque parecido en el norte de Quintana Roo. La diferencia en la altura de los árboles grandes fue principalmente debida a la disminución del número de individuos después del huracán, la pérdida de ramas y la ruptura del tronco de los árboles remanentes de algunas de las especies como *M. zapota*. Olmsted *et al.* (1990) y Sánchez e Islebe (1999) encontraron una disminución en el área basal mucho mayor que lo encontrado en este estudio para bosques similares al estudiado, afectados por el huracán Gilberto en 1988. Sin embargo, debido a que dichos autores midieron árboles con menores

diámetros que los considerados en este estudio no es posible hacer una comparación entre ambos estudios.

El daño ocasionado sobre las características estructurales de especies como *M. zapota*, *M. brownei*, *P. ellipticum* y *S. salvadorensis* puede resultar crítico, puesto que estas especies están sujetas a extracción forestal. No obstante, la ocurrencia de huracanes es también una oportunidad para favorecer el rápido crecimiento de especies heliófilas como la caoba, la cual requiere de la apertura de claros para su regeneración. Al respecto, Snook (1993) menciona que los huracanes crean las condiciones adecuadas para la regeneración de *S. macrophylla*, la cual resiste los vientos huracanados; mientras que *M. zapota* es mucho más vulnerable a la fuerza de los huracanes, como pudo observarse en este estudio.

Los valores de los índices de diversidad de Shannon encontrados en este estudio son mucho menores que los hallados por Sánchez e Islebe (1999), esta diferencia se debe a la mayor cantidad de especies (82 y 76 pre y post-huracán, respectivamente) reportadas por estos autores en comparación con los resultados de este estudio (54 y 51 especies, pre y post-huracán, respectivamente), lo cual está relacionado con el tamaño de los árboles incorporados en los análisis.

La igualdad en los valores de H', antes y después del huracán, indica que la pequeña disminución (4,15) en el número de individuos no fue suficiente para modificar sus proporciones dentro del conjunto total de especies. Asimismo, los altos valores de equitatividad sugieren una distribución más homogénea de los individuos dentro de las especies en las unidades de muestreo, tanto antes como después del huracán (Tabla 2).

Dominancia de árboles grandes

A pesar del daño sufrido por algunos individuos de *M. zapota* y *B. simaruba*, dos especies típicas de la selva mediana subperennifolia (Miranda, 1978; Martínez y Galindo, 2002) fueron las especies dominantes de la vegetación en el área de estudio, tanto antes como después del huracán, ocupando alrededor de 40% del total de árboles en las ocho parcelas de muestreo. Sin embargo, especies con importancia comercial como *S. cubensis*, *P. ellipticum*, *M. brownei*, *L. latisiliquum* y *S. macrophylla*, también se encuentran entre las 15 especies con los mayores valores de importancia y que en conjunto ocupan 85% de los árboles en la comunidad estudiada. Al respecto es importante hacer notar que después del huracán, *L. latisiliquum* y *S. ma*crophylla, las dos especies con mayor demanda en el mercado nacional incrementaron su nivel de importancia debido a un ligero aumento en su área basal relativa, ya que éstas fueron menos impactadas que otras especies. Como en el presente estudio, Sánchez e Islebe (1999) encontraron que *M. zapota* mantiene su posición en la importancia después del huracán, a pesar de ser una de las especies del dosel mayormente afectadas.

Manejo forestal y vulnerabilidad del bosque ante huracanes

Dado que la diversidad, la estructura y la función de los ecosistemas son moldeadas por disturbios, el manejo de bosques naturales puede estar basado en el entendimiento ecológico de los procesos de un disturbio natural (Attiwil, 1994). En Quintana Roo, la frecuente ocurrencia de huracanes es uno de los factores determinantes en la dinámica del bosque y, por ello, es muy importante incorporar la comprensión de la respuesta

de los ecosistemas a las perturbaciones ocasionadas por huracanes en el manejo forestal. Además, el aprovechamiento forestal y algunos tratamientos silviculturales reducen la densidad de las especies extraídas, generando un dosel más heterogéneo, lo que reduce la estabilidad de los bosques remanentes, afectando su resistencia al viento (Foster, 1988; Everham y Brokaw, 1996; Zeng *et al.*, 2009; Garrido *et al.*, 2008). Respecto a lo anterior, cabe mencionar que aunque en el presente estudio no se evaluó el efecto del huracán en bosques intervenidos y no intervenidos, debido a la falta de sitios en esta última condición, durante el trabajo de campo fue claro que sitios que presentaron evidencia de aprovechamiento reciente (caminos de extracción, bacadillas) fueron más afectados que sitios sin rastros de extracción (parcelas 3 y 5, Tabla 2).

Existe poca evidencia del efecto de estos fenómenos en bosques manejados y no manejados. Rivas *et al.* (2000) encontraron que en el bosque intervenido hubo una mayor proporción de árboles quebrados, desenraizados o inclinados que en el bosque no intervenido. En este último sólo se encontraron árboles defoliados y desramados. De acuerdo con sus resultados estos autores proponen que el manejo forestal debe tomar en cuenta tres factores para adaptarse mejor a un régimen de huracanes frecuentes: el tamaño y distribución de los claros, la permanencia de la regeneración a través de la presencia de árboles semilleros y el aprovechamiento de la madera caída.

Por su parte, Acosta *et al.* (2001) observaron que en un bosque afectado por el huracán Mitch en Nicaragua, la regeneración de especies comerciales fue más alta en el bosque intervenido que en el no intervenido, probablemente debido a que el huracán causó más aperturas en el bosque. Asimismo, encontraron que la mortalidad fue mayor (10,9%) en el bosque intervenido que en el no intervenido (4%). Sugieren el mantenimiento de suficientes árboles semilleros durante el aprovechamiento. Para la misma área en Nicaragua, Ferrando *et al.* (2001) proponen estratificar los aprovechamientos con base en las características del bosque remanente y la intensidad del daño, tratando de producir una mezcla de rodales con una estructura y composición del dosel homogénea y una regeneración adecuada.

Recientemente se han desarrollado una serie de modelos y técnicas de análisis estadístico para predecir la velocidad del viento necesario para desenraizar o quebrar los troncos de los árboles basados en características de los individuos y del rodal (Peltola *et al.*, 1999; Zeng *et al.*, 2004, 2007; Heinonen *et al.*, 2009). Con base en estos modelos, se sugiere que para minimizar los efectos del manejo sobre el daño por viento es necesario disminuir el área de borde, concentrar áreas de corta y establecer una intensidad adecuada de cosecha. Por su parte, Heinonen *et al.* (2009) sugieren que la mejor estrategia de corta para minimizar el riesgo de daño por viento, depende de las características del área planeada, tales como la estructura y composición de especies del bosque.

Asimismo, la información sobre el efecto de los huracanes en la dinámica de especies heliófilas como *S. macrophylla* y *Cedrela odorata*, puede ayudar a establecer lineamientos para su manejo en bosques expuestos a estas perturbaciones. Según Snook (1993), *S. macrophylla* está adaptada biológicamente para aprovechar los daños ocasionados periódicamente por los huracanes (Snook, 1993). Evidencia de ello son sus amplias copas aerodinámicas sostenidas por pocas ramas muy gruesas y fuertes, sus raíces muy profundas y la presencia

de grandes contrafuertes de hasta 3 m de altura. Estas características favorecen su supervivencia a los huracanes, que generalmente tumban o quiebran muchos árboles grandes de otras especies (Snook, 2005). Además, como en muchas especies heliófilas, los claros producidos en el dosel del bosque por estos disturbios favorecen el reclutamiento de nuevos individuos de la caoba.

En plantaciones forestales, Thompson *et al.* (2007) encontraron que entre 1989 y 1996, después del huracán Hugo (categoría 4), la densidad de *S. macrophylla* incrementó muy poco, mostrando un incremento más significativo después del huracán George (categoría 5). Por otro lado, estos autores encontraron que la especie presentó un número similar de tallos, tanto en bosques perturbados como no perturbados. Estos resultados confirman que si bien la caoba requiere de la apertura de grandes claros, también es capaz de sobrevivir en bosques cerrados.

CONCLUSIONES

A pesar de la magnitud del huracán Dean en el área de estudio, la composición y diversidad del bosque no resultaron fuertemente afectadas. Los mayores efectos fueron sobre la estructura del bosque, aunque no se encontró una diferencia significativa. Los principales tipos de daño fueron desramado, desenraizado y fractura del tronco (quebrado). Los árboles del sotobosque fueron más afectados que los árboles del dosel. Al parecer la presencia de caminos de extracción y áreas de concentración de madera (bacadillas) incrementa la susceptibilidad del sotobosque a los huracanes debido a la apertura del dosel que favorece la entrada del viento hacia el piso forestal.

Se sugiere que para disminuir la susceptibilidad del bosque al impacto de huracanes se requiere disminuir la cantidad y superficie de bacadillas por área de corta. Asimismo, se propone que una vez ocurrido el huracán, se incorpore al plan de manejo forestal, el aprovechamiento de los árboles dañados y se establezcan algunas áreas de corta anual en los sitios más afectados. Para disminuir los riesgos de incendios forestales y la presencia de plagas en los sitios afectados, se propone la realización de cortas de saneamiento.

Se sugiere también, establecer a nivel estatal un programa de monitoreo de las áreas afectadas y no afectadas, a fin de conocer a mayor detalle la dinámica del bosque y los mecanismos de recuperación de especies ecológica y económicamente importantes, para planear alternativas de manejo a largo plazo. Para ello se propone recuperar el sistema de parcelas permanentes establecido en el estado entre 1990 y 1991, con la finalidad de complementar la información obtenida en los inventarios forestales para el aprovechamiento de productos maderables. Asimismo, es necesario el establecimiento de nuevas parcelas para evaluar la dinámica del bosque afectado por disturbios como el aprovechamiento forestal, los huracanes y la subsecuente presencia de fuego.

REFERENCIAS

Acosta L., B. Louman y G. Galloway. 2001. Regeneración de especies arbóreas después del huracán Mitch, en bosques manejados de la costa Norte de Honduras. Revista Forestal Centroamericana 34:61-65.

Attiwill, P.M. 1994. The disturbance of forest ecosystems: the ecological bases for conservative manage-

ment. Forest Ecology and Management 63:247-300.

Bellingham, P.J., V. Kapos, N. Varty, H.R. Healey, E.V.J. Tanner, D.L. Kelly, J.W. Dalling, L.S. Burns, D. Lee y G. Sidrak. 1992. Hurricane need not cause high mortality: the effects of Hurricane Gilbert on forest in Jamaica. Journal of Tropical Ecology 8:217-223.

Boucher, D.H. 1990. Growing back after hurricane. Catastropohes may be critical to rain forest dynamics. Bioscience 40(3):163-166.

Chazdon R.L. 2003. Tropical forest recovery: legacies of human impact and natural disturbance. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics 6(1,2):51-71.

Dickinson M.B., S.M. Hermann y D.F. Whigham. 2001. Low rates of background canopy-gap disturbance in a seasonally dry forest in the Yucatan Peninsula with of fires and hurricanes. Journal of Tropical Ecology 17:895-902.

Everham, E.M. III y N.V.L. Brokaw. 1996. Forest damage and recovery from catastrophic wind. The Botanical Review 62(2):113-185.

Ferrando J.J., B. Louman, B. Finegan y M. Guariguata. 2001. Pautas ecológicas para el manejo de bosques naturales afectados por huracanes en la costa norte de Honduras. Revista Forestal Centroamericana 28-34.

Foster, D.R. 1988. Species and stand response to catastrophic wind in central New England, USA. Journal of Ecology 76:135-151.

Frangi, J.L. y A.E. Lugo. 1991. Hurricane damage to flood plain forest in Luquillo Mountains of Puerto Rico. Biotropica 23:324-335.

García, E. 1987. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 4a. ed. UNAM. 217 p.

Garrido P., E.I., J.M. Dupuy, R. Durán, M. Ucan M., S.A. Schnitzer y G. Gerold. 2008. Effects of lianas and hurricane Wilma on tree damage in Yucatán peninsula, México. Journal of Tropical Ecology 24:559-562.

Gobierno del Estado de Quintana Roo. 2007. Evaluación del riesgo forestal por el huracán Dean. Subcomité para la evaluación de afectación de los recursos forestales dentro del Comité de Evaluación de Daños del FONDEN en Quintana Roo. 18 p.

Harcombe P.A., L.A. Mann L. e I.S. Elsik. 2009. Effects of hurricane Rita on three long-term forest study plots in East Texas, USA. Wetlands 29(1):88-100.

Harmon, M.E., D.F. Whigham, J. Sexton e I. Olmstead. 1991. Decomposition and mass of woody detritus in the dry tropical forests of the northeastern Yucatan peninsula, Mexico. Biotropica 27(3):305-316.

Heinonen, T., T. Pukkala, V.P. Ikonen, H. Peltola, A. Vernäläinen y S. Dupont. 2009. Integring the risk of wind damage into forest planning. Forest Ecology and Management 258:1567-1577.

Hernández C., M.E., E. Azpra R., G. Carrasco A., O. Delgado D. y F.J. Villicaña C. 2001. Los ciclones tropicales de México. Temas selectos de

geografía de México. UNAM, México.120 p.

Hernández U., A. s/a. Reseña del huracán Dean del Oceano Atlantico. Conagua. Informe interno. 12 p.

Lugo, A.E. 2000. Effects and outcomes of Caribbean hurricanes in a climate change scenario. The Science of the Total Environment 262:243-251.

Martínez, E. y C. Galindo-Leal. 2002. La vegetación de Calakmul, Campeche, México: clasificación, descripción y distribución. Boletín de la Sociedad Botánica de México 71:7-32.

Magurran A.E. 2004. Measuring Biological Diversity. Blackwell Publishing. U.K.

Miranda, F. 1978. Vegetación de la Península Yucateca. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 271 p.

Muller-Dumbois, D. y H. Ellenberg. 1974. Aims and methods of vegetation ecology. John Wiley & Sons. Nueva York, EUA. 550 p.

Navarro M., M.A. 2011. La caoba: más de un siglo de aprovechamiento. *In*: C. Pozo, N. Armijo C. y S. Calmé (eds.). Riqueza biológica de Quintana Roo. Un análisis para su conservación. Tomo1. ECOSUR/CONABIO/FMAM/ SEDUMA. México. pp. 212-220.

Olmstead I., J. Palma, I. Pérez del Valle, J. Castillo e Y. Moreno. 1990. Efecto de las perturbaciones por huracán y fuego sobre la estructura y composición de la selva mediana subperennifolia en el norte de Quintana Roo. Resúmenes del Congreso Mexicano de Botánica. Oaxtepec, Morelos, México.

Peltola. H., S. Kellomäki, H. Venäläinen y V.P. Ikonen. 1999. A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of Scots pine, Norway spruce and birch . Canadian Journal of Forest Research 29:647-661.

Pickett, S.T.A. y P.S. White. 1985. The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics. Academic Press, EUA, 472 pp.

Putz F.E., P.D. Coley, K. Lu, A. Montalvo y A. Aiello. 1983. Uprooting and Snapping of tres: structural determinants and ecological consequences. Canadian Journal Forest Research 13:1011-1020.

Putz, F.E. y R.R. Sharitz. 1991. Hurricane damage to old-growth forest in Conaree Swamp Nationale Monument, South Carolina, USA. Canadian Journal of Forest Research 21:1765-1770.

RAN-INEGI. 1998. Plano definitivo de tierras de uso común del ejido Xhazil. Esc 1:50,000.

Rivas H., M. Kanninen, B. Louman, B. Finegan y G. Galloway. 2000. Zona norte de Honduras, daños causados por el huracán Mitch en rodales intervenidos y no intervenidos. Revista Forestal Centroamericana 30 (núm. especial):58-62.

Rogan J., L. Schneider, Z. Christman, M. Millones, D. Lawrence y B. Schmook. 2011. Hurricane Disturbance Mapping using MODIS EVI Data in the South Eastern Yucatán, Mexico. Remote Sensing Letters 2(3):259-267.

Sánchez S., O. y G.A. Islebe. 1999. Hurrican Gilbert and structural

changes in a tropical forest in southeastern Mexico. Global Ecology and Biogeography 8:29-38.

Sánchez S., O. y G.A. Islebe. 2002. Tropical forest communities in southeastern Mexico. Plant Ecology 158:183-200.

Snook, L.K. 1993. Stand dynamics of mahogany (*Swietenia macrophylla* King.) and associated species after fire and hurricane in the tropical forests of the Yucatan Peninsula, Mexico. Tesis doctoral. Yale University. 240 p.

Snook, L.K. 2005. Aprovechamiento sostenido de caoba en la selva maya de México. De la conservación fortuita al manejo sostenible. Revista Recursos Naturales y Ambiente 44:9-18.

Sousa W.P. 1984. The Role of Disturbance in Natural Communities Annual Review of Ecology and Systematics 15:353-39.

Thompson, J.; A.E. Lugo y J. Tomlinson. 2007. Land use history, hurricane disturbance, and fate of introduced species in subtropical wet forest in Puerto Rico. Plant Ecology 192: 289-301.

Turner, B.L. 1978. Ancient agriculture land use in the Central Maya lowlands. *In*: Harrison P.D. and B.L. Turner. Prehispanic Maya Agriculture. University of New Mexico Press. Albuquerque. p: 163-183.

Vandercar, K.L., D. Lawrence, D. Richards, L. Schneider, J. Rogan, B. Schmook y H. Wilbur. 2011. High mortality for rare species following hurricane disturbance in the Southern Yucatan. Biotropica 1-9.

Vester H.F.M. y I. Olmsted. 2000. Efecto de los huracanes en la selva. *In*: Vester H. F.M. (coord.). Influencia de los huracanes en el paisaje de Yucatán. Consideraciones para el diseño de corredores y su manejo. Informe de proyecto. México. 216 p.

Vester, H.F.M., M.A. Navarro M., C.Y. López, V.E. Canul U., M. Wetering y S. Shonck. 2005. Subproyecto Bosques. Informe del Proyecto uso y monitoreo de los recursos naturales en el corredor biológico mesoamericano (áreas focales Xpujil-Zoh Laguna y Carrillo Puerto). ECOSUR/CONABIO. Chetumal, Q. Roo. 64 p.

Walker, L.R. 1991. Tree damage and recovery from hurricane Hugo in Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico. Biotropica 23 (4a):379-385.

Whigham, D.F., I. Olmsted; E. Cabrera C. y M.E. Hartman. 1991. The impact of Hurricane Gilbert on trees, litterfall, and woody debris in a dry tropical forest in the northeastern Yucatan Peninsula. Biotropica 23(4a):434-441.

Whigham, D.F., I. Olmsread, E. Cabrera C. y A.B. Curtis. 2003. Impacts of hurricanes of the forests of Quintana Roo, Yucatan Peninsula, Mexico. *In*: Gómez-Pompa, A., M. F. Allen, S.L. Fedick and J.J. Jimenez-Osornio (eds.). Lowland Maya Area. Three Millenia at the human-wildland interface. Haworth Press, Inc. USA. p: 193-212.

Xi W., R.K. Peet y D.L. Urban. 2008. Changes in forest structure, species diversity and spatial pattern following hurricane disturbance in Piedmont North Carolina forest, USA. Journal of Plant Ecology 1-15.

You, C. y H. Petty. 1991. Effects of hurricane Hugo on *Manilkara bidentata*, a primary tree species in the Luquillo Experimental Forest of Puerto Rico. Biotropica 23:400-406.

Zeng H., H. Peltola, A. Talkkari, H. Venäläinen, H. Strandman, S. Kellomäki y K. Wang. 2004. Influence of clear-cutting on the risk of wind damage at forest edges. Forest Ecology and Management 203:77-88.

Zeng H., T. Pukkala y H. Peltola. 2007. The use heuristic optimization in risk management of wind damage in forest planning. Forest Ecology and Management 241:189-199.

Zeng, H.T.; H. Peltola, H. Venäläinen y S. Kellomäki. 2009. The effects of fragmentation on the susceptibility of boreal forest ecosystem to win damage. Forest Ecology and Management 257:1165-1173.

Zimmerman J.K., E.M. Everham III. R.B. Waide, D.J. Lodge, C.M. Taylor, N.V.L. Brokaw. 1994. Responses of Tree Species to Hurricane Winds in Subtropical Wet Forest in Puerto Rico: Implications for Tropical Tree Life Histories. The Journal of Ecology 82(4):911-922.

Manuscrito recibido el 25 de octubre de 2011.
Aceptado el 13 de marzo de 2012.

Este documento se debe citar como: Navarro-Martínez, A., R. Durán-García y M. Méndez González. El impacto del huracán Dean sobre la estructura y composición arbórea de un bosque manejado en Quintana Roo, México. *Madera y Bosques* 18(1):57-76.

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Estimación de la densidad de madera en árboles de comunidades forestales templadas del norte del estado de Durango, México

Estimating bole wood specific gravity in trees of temperate forest communities of northern Durango, Mexico

Flor María Silva-Arredondo[1] y José de Jesús Návar-Cháidez[2*]

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue el de estimar la densidad básica de la madera y su nivel de variación con la altura y el diámetro en árboles de varias especies de los géneros *Pinus* y *Quercus* del norte del estado de Durango, México. Para esto se tomaron 843 especímenes a diferentes alturas del fuste y en diferentes secciones diamétricas de un muestreo aleatorio en 113 árboles. Se elaboraron probetas con dimensiones de 2,5 cm x 2,5 cm x 2,5 cm. Los resultados muestran que la densidad básica es estadísticamente diferente entre los componentes de albura y duramen (P > F = 0,0001) y la altura relativa (P > F = 0,0001) del fuste en el género *Pinus*. Para el género *Quercus* no se encontraron diferencias estadísticamente significativas con los componentes de la madera o con la altura relativa. Los cálculos matemáticos indican que la densidad básica se debe de estimar a una altura dada por 0,22H y no como convencionalmente se hace a 1,3 m.

PALABRAS CLAVE:
Albura y duramen, altura relativa, densidad de madera, nivel de variación.

ABSTRACT

The objective of this research was to estimate basic wood specific gravity and its level of variation among biomass components of trees of several species of the genera *Pinus* and *Quercus* of northern Durango, Mexico. A total of 843 wood core sepecimens were taken at different heights and at different diameter sections from 113 trees. Fresh wood blocks of 2,5 cm x 2,5 cm x 2,5 cm were measured and once they were oven dried they were weighted to estimate the wood specific gravity. Results showed that the basic wood specific gravity was statistically different between biomass components along the diameter and height gradients (P > F = 0,0001) for trees of the genus *Pinus* unlike for trees of the genus *Quercus*. Mathematical evaluations show that wood cores for measuring the bole wood specific gravity must be taken at a height of 0,22H instead of the traditional height of 1,3 m at which it is conventionally evaluated.

KEY WORDS:
Sapwood and heartwood, relative height, wood density, level of variation.

1 Consultora Forestal. Linares, N.L., México.
2* Profesor-Investigador de Manejo de Recursos Naturales. CIIDIR-IPN Unidad Durango. Sigma núm. 119. Fracc. 20 de Noviembre II. Durango, Dgo. 34220. México. c.e.: jnavar@ipn.mx. Autor para correspondencia.

INTRODUCCIÓN

La densidad básica (peso seco entre volumen húmedo) es un variable intrínseca de la madera que describe la cuarta dimensión del arbolado (Návar, 2010). Esta variable se emplea para estimar la biomasa de árboles y rodales forestales por medio de ecuaciones físicas o empíricas (Mohren y Klein Goldewijkt, 1994; Chavé *et al.*, 2005; Návar, 2011). Es también necesaria para estimar los contenidos de varios elementos biogeoquímicos que se encuentran en las plantas (Chavé, 2002; Návar, 2009a, 2009b). La densidad básica se considera una característica de importancia económica, ya que determina en gran medida la calidad del producto final que se obtenga del árbol (Zobel y Van Buijtenen, 1989). Además, la productividad total de un rodal que es una variable que se encuentra en función de la biomasa de un árbol o de un rodal puede determinarse cuando se conoce la densidad promedio de la madera (Jenkins *et al.*, 2001; Zobel y Talbert, 1988).

Por otro lado, la densidad de la madera varía dentro de la planta, durante la vida de la planta y entre individuos de una misma especie (Chavé, 2002; Daniel *et al.*, 1982; Hocker, 1984; Parolin, 2002; Zobel y Talbert, 1988; Zobel y Van Buijtenen, 1989; Van Buijtenen, 1963). Varios factores del sitio, específicamente la cantidad de humedad presente en forma de precipitación o de cantidad de agua del suelo, parecen explicar en parte la variación tan amplia que presentan los individuos de una misma especie (Parolin, 2002).

La densidad básica varía también a lo largo del fuste y de la corteza hacia el centro del fuste. Esto sucede porque la parte distal de los árboles está compuesta por madera relativamente nueva, del año presente o anterior, mientras que en la parte basal del fuste la proporción de madera nueva es relativamente baja y la madera presente contiene un rango de edades anuales desde el nacimiento del árbol hasta el presente. Pocos trabajos han descrito la función de la densidad básica con la altura relativa del árbol. De la periferia al centro del fuste se encuentran: la corteza, la albura y el duramen. Estos componentes poseen también diferentes valores de densidad básica (Fearnside, 1997; Parolin, 2002; Návar *et al.*, 2005). Una fuente importante de datos fue publicada recientemente sobre la densidad de la corteza y de la madera para árboles de Norteamérica por Miles y Smith (2009) que refleja en términos generales que la densidad básica es similar en la madera y en la corteza, pero que al nivel del árbol individual o de la especie se notan variaciones importantes. A pesar de estas diferencias, el método estándar para tomar muestras de madera para la medición de la densidad básica es a 1,30 m de la altura del árbol. Esto es, la toma de muestras se hace convencionalmente al diámetro a la altura del pecho (DAP) y corre el riesgo de sesgar la estimación de la cantidad de la biomasa y por consiguiente de otros parámetros derivados, tales como la biomasa, el contenido y los flujos de varios elementos bio-geoquímicos o la productividad de la especie o del rodal.

Como consecuencia, los objetivos del presente estudio fueron: a) determinar y b) modelar el comportamiento de la densidad básica a diferentes alturas relativas del fuste en la albura y el duramen de las principales especies de *Pinus* y *Quercus* del norte del estado de Durango, México. La hipótesis intrínseca que se plantea es que no existen variaciones de esta variable con la altura relativa del árbol, así como tampoco entre los componentes albura y duramen y, finalmente, que la densidad promedio de un árbol se puede estimar utilizando muestras de un

punto del fuste a 1,30 m. Las especies de pino estudiadas fueron *P. arizonica* Engelmann, *P. durangensis* Martínez, *P. engelmannii* Carriere, *P. teocote* Schiede ex Schelchdental et Chamisso, *P.cooperi* Blanco y *P. leiophylla* Schiede ex Schelchdental et Chamisso. Las especies de encino muestreadas, de donde se colectaron las probetas fueron: *Q. sideroxylla* Humb & Bonpl. y *Q. crassifolia* Humb & Bonpl.

METODOLOGÍA

Área de estudio

El presente trabajo se realizó en las comunidades forestales El Tarahumar, El Tule y La Soledad, que se ubican en la Sierra Madre Occidental en los municipios de Tepehuanes y Guanaceví del estado de Durango. Se localizan específicamente al noroeste de la cabecera municipal de Tepehuanes y al oeste de la cabecera municipal de Guanacevi, dentro de las coordenadas de 25º 33´ 48´´ a 25º 49´07´´ latitud Norte y de 106º 11´04´´ a 106º 37´22´´ de longitud oeste con respecto al meridiano de Grenwich (Fig.1). Los tipos de vegetación presentes en la zona corresponden a bosques de pino, de pino-encino, de encino y otras asociaciones de pino-otras coníferas y pino-otras hojosas, donde los bosques más importantes en el área son del género *Pinus,* con una amplia distribución, encontrándose la mayor presencia de las especies *Pinus arizonica*, *Pinus teocote* y *Pinus durangensis*, siendo posible encontrar manchones puros de encino cuyas especies presentes son *Q. crasifolia*, *Q. rugosa*, *Q. sideroxylla*, etcétera.

La región se encuentra dentro de la provincia fisiográfica denominada Sierra Madre Occidental en la Subprovincia Sierra y Cañones Duranguenses. El clima que prevalece en el área de estudio es templado frío húmedo, C(w0) y C(w2), con una temperatura media anual de 10,5 ºC y una precipitación media anual de 932 mm, con lluvias en verano. En general, los tipos de suelos que se encuentran en la región son los Litosoles, aunque también existen con menor frecuencia los Regosoles y los Feozems (INEGI, 2002).

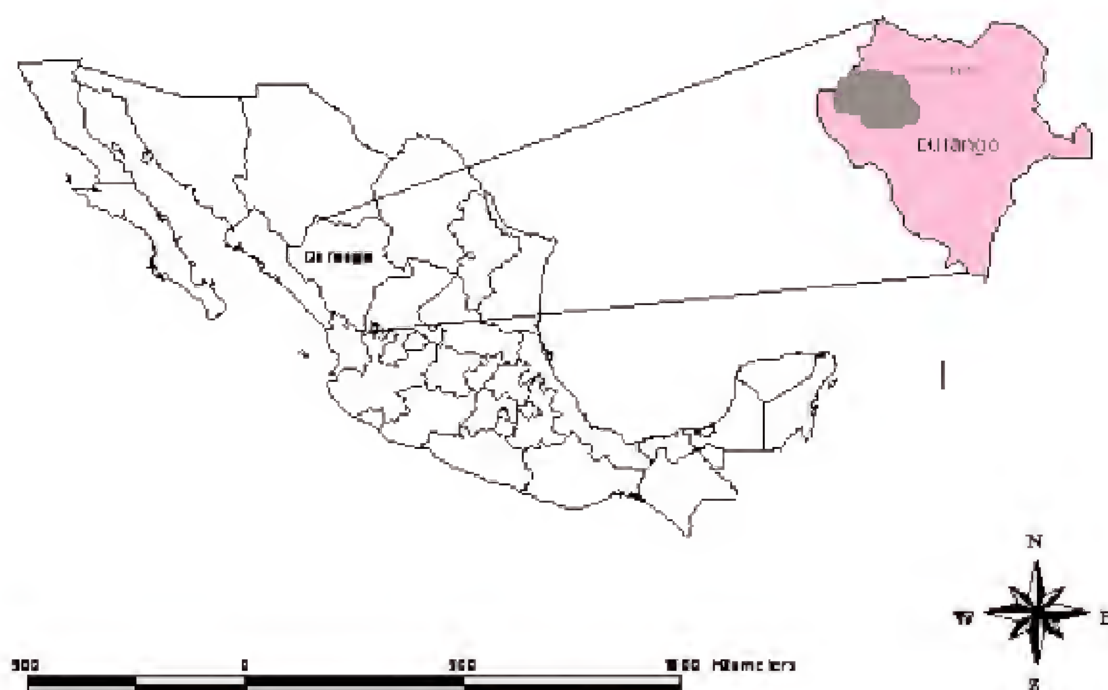


Figura 1. Localización del área de estudio en el noroeste de Durango, México.

Selección de los árboles muestra

Se establecieron tres sitios de muestreo en las localidades conocidas como El Tule, La Soledad y Tarahumar, en los cuales se seleccionaron 66, 34 y 13 individuos, respectivamente, cubriendo todas las categorías presentes en las diferentes áreas de corta de los aprovechamientos autorizados en los programas de manejo forestal vigentes de los servicios técnicos forestales. La variabilidad en el tamaño de muestra obedece al número de especies presentes en cada uno de los sitios y las categorías diamétricas existentes en las áreas de corta.

Preparación de las probetas

En cada árbol muestreado o derribado, el fuste se cortó en secciones de 2,5 m y se tomaron rodajas de cada sección a partir del tocón hasta la punta del árbol, registrándose el nombre de la especie, número de árbol, peso verde y altura de la sección (Figura 2). Posteriormente, se trasladaron al laboratorio y de cada rodaja se obtuvo una sección transversal de 6 cm de ancho y el largo en función del diámetro de la muestra. De esta muestra se tomó una probeta de 2.5 x 2.5 x 2.5 cm de la albura y otra del duramen (Fig. 3), las cuales se pesaron y se midieron en estado verde, llevándose a la estufa de secado a una temperatura constante de 105 ºC hasta obtener un peso constante determinando su peso seco y volviéndose a medir (Tabla 1). En total se colectaron 843 probetas, de las cuales 758 y 85 correspondieron a los géneros *Pinus* y *Quercus*, respectivamente, y de las cuales 451 y 392 a la albura y el duramen, respectivamente.

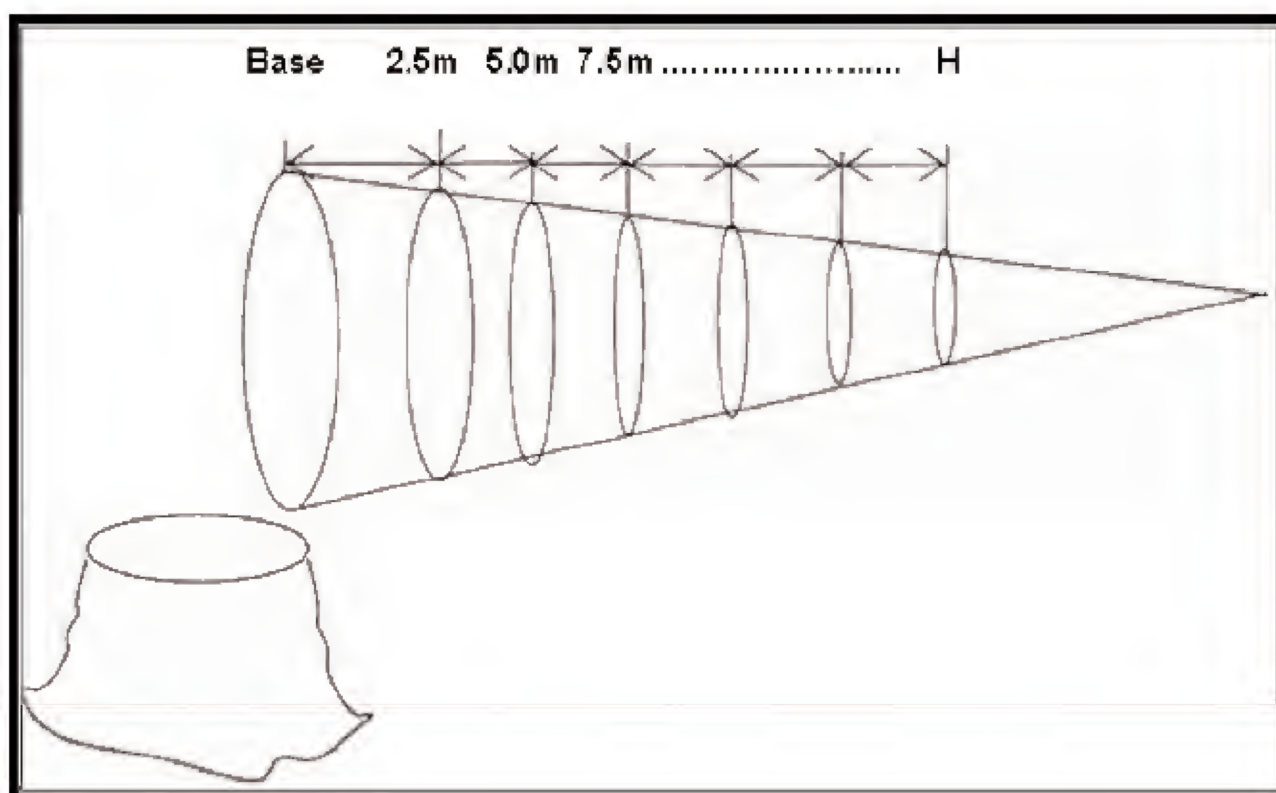


Figura 2. Rodajas tomadas a cada 2,5 m de las secciones del árbol para la obtención de las probetas.

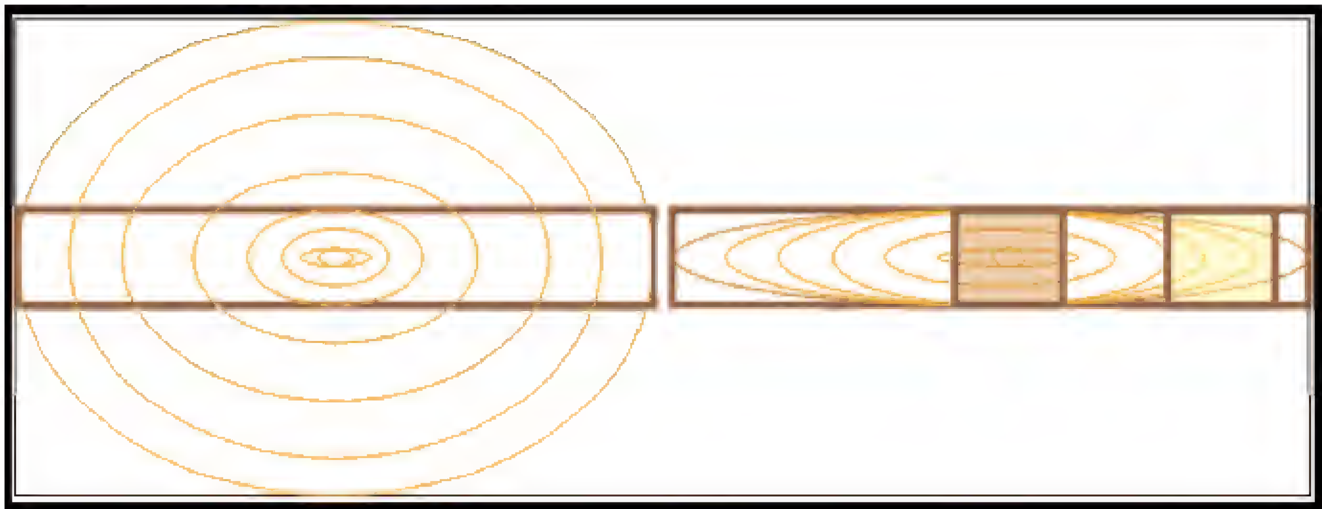


Figura 3. Obtención de probetas a lo largo de una sección del fuste.

Tabla 1. Lugar de procedencia, número de individuos y probetas por componente de los árboles analizados.

Predio	*Género*	*Núm. individuos*	*Componente*	*Probetas analizadas*
El Tule	*Pinus spp*	36	Duramen	217
			Albura	193
	Quercus spp	3	Duramen	12
			Albura	8
La Soledad	*Pinus spp*	29	Duramen	132
			Albura	114
	Quercus spp	5	Duramen	23
			Albura	19
El Tarahumar	*Pinus spp*	10	Duramen	55
			Albura	47
	Quercus spp	3	Duramen	12
			Albura	11

Procedimiento estadístico

A cada probeta obtenida de la albura y el duramen se le determinó la densidad básica, ρ, de la siguiente forma: ρ = peso anhidro/volumen verde. Con los datos de densidad básica se realizó un análisis de varianza para identificar diferencias con la altura relativa del fuste y con los componentes albura y duramen. Se utilizó el paquete estadístico SAS para correr el análisis estadístico y para el ajuste de las regresiones conducentes. El modelo lineal se ajusta bien a la relación de la densidad básica promedio con la altura relativa del árbol, como sigue:

$$\rho = \alpha' + \beta\left(\frac{h}{H}\right)$$

donde

α: parámetro que representa la intercepta de la relación r contra (h/H) y que se interpreta como la densidad básica a la base del fuste.
β: parámetro que representa la pendiente de la relación r contra (h/H) y que representa la tasa de cambio en la densidad básica en función de la altura relativa del árbol.
h: altura i del fuste
H: altura total del fuste.

Los parámetros estadísticos α y β fueron estimados por medio de la técnica de cuadrados mínimos en regresión lineal, expresada en Návar (2009c). El punto de la altura en el cual se debe de tomar la muestra para obtener una probeta y medir la densidad básica promedio se determina, de acuerdo con Návar (20011), por medio de la ecuación siguiente:

$$E(X) = \int_{h/H=0}^{h/H=1} \left[\alpha + \beta\left(\frac{h}{H}\right)\right]\left(\frac{h}{H}\right)\delta\left(\frac{h}{H}\right)$$

$$E(X) = \overline{X} = \int_{h/H=0}^{h/H=1} [\alpha + \beta(X)](X)\delta X$$

$$\int_{0}^{1.0} \alpha X + \beta X^2 \delta X$$

$$\frac{\alpha}{2}X^2 + \frac{\beta}{3}X^3$$

donde

δ: Densidad básica promedio.
α y β: Parámetros estadísticos a estimar.
h/H: Altura relativa del árbol.

La desviación estándar y el intervalo de confianza de la longitud de la troza, donde se puede evaluar el intervalo de la altura, de donde se puede determinar la densidad básica de la madera, se estimaron, de acuerdo con Návar (2011) de la siguiente manera:

$$S(X) = S = \sqrt{E(X^2) - [E(X)]^2}$$

$$E(X^2) = \int_{x=0}^{x=1} X^2(\alpha + \beta X)\delta X$$

$$= \int_{x=0}^{x=1} \alpha x^2 + \beta x^3 \delta x$$

$$= \frac{\alpha}{3}x^3 + \frac{\beta}{4}x^4$$

$$\sqrt{\left[\frac{\alpha}{3}x^3 + \frac{\beta}{4}x^4\right] - \left[\frac{\alpha}{2}x^2 + \frac{\beta}{3}x^3\right]^2}$$

donde

S: Desviación estándar.
X: Altura relativa.
α y β: Parámetros estadísticos a estimar.

El intervalo de confianza se estima de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$I.C. = X \pm \frac{SD}{\sqrt{n}} \cdot t_{\alpha,n-2}$$

donde

I.C.: Intervalo de confianza.
α: 0,05.
SD: Desviación estándar,
n: Número de datos

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El valor promedio encontrado en la densidad básica del género *Pinus* fue de 0,47 g cm^{-3} con valores mínimo y máximo de 0,35 g cm^{-3} y 0,59 g cm^{-3}, por lo que puede considerarse, de acuerdo con Echenique y Plumptre (1994), como una madera medianamente pesada (Tabla 2). El valor promedio estimado en este género parece ser ligeramente menor al calculado por López y Valencia (2001) para *Pinus*

greggii en el norte de México, quienes encontraron valores de entre 0,40 g cm^{-3} y 0,58 g cm^{-3} y mayor a los valores promedio registrados por Pérez *et al.* (2000) en *Pinus taeda*, quienes determinaron un valor promedio de 0,38 g cm^{-3}, con valores mínimo y máximo de 0,29 g cm^{-3} a 0,58 g cm^{-3}.

La densidad básica promedio varió entre las especies estudiadas (Fig. 4). Aunque las variaciones más notorias fueron entre los géneros de pino (0,47 ± 0,05) y encino (0,77 ± 0,02), también se registraron diferencias estadísticamente significativas entre las especies del género *Pinus*. *P. teocote* (0,52 ± 0,07) registró valores mayores que *P. arizonica* (0,42 ± 0,03).

Para los componentes de la madera, para el género pino, el duramen fue diferente también entre las especies *P. teocote* (0,57 ± 0,10) y *P. arizonica* (0,39 ± 0,028). En la albura, *P. durangensis* (0,53 ± 0,05) registró mayores valores que *P. cooperi* (0,44 ± 0,025).

Las variaciones tan amplias en la desviación estándar fueron del orden de 0,05 g cm^{-3}; con desviaciones mínimas y máximas de 0,032 y 0,085 g cm^{-3}, respectivamente. Considerando que esta variable se distribuye normalmente, 68% de la densidad básica que se ha publicado para estos pinos tendrá valores de 0,47 g cm^{-3} ± 0,05 g cm^{-3}. Se ha discutido que esta variable se encuentra en función de las características del sitio tales como: contenido de humedad del suelo, productividad, densidad o grado de densidad del arbolado, etc. (Parolin, 2002). Sin embargo, estas variables no fueron medidas cuando se cosecharon los árboles para este estudio y como consecuencia tampoco se puede especular más sobre la dependencia de esta variable con aquellas no medidas.

El valor promedio encontrado en la densidad básica del género *Quercus* fue de 0,77 g cm^{-3} con valores mínimos y máximo de 0,61 g cm^{-3} a 0,86 g cm^{-3}, por

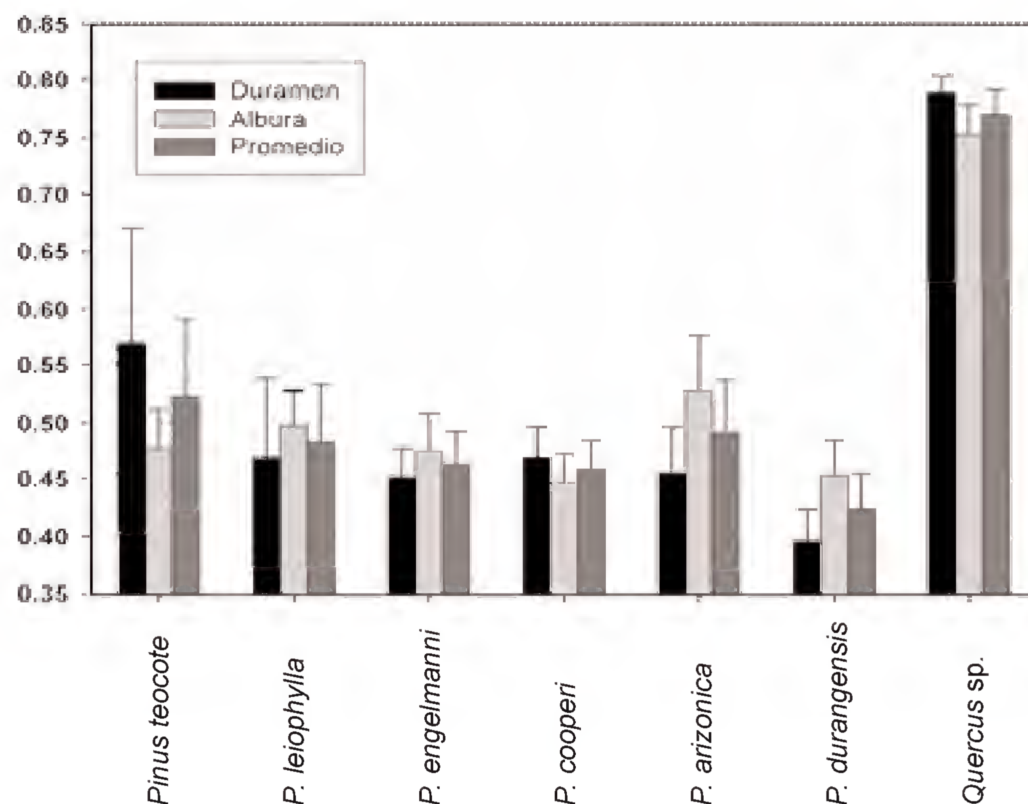


Figura 4. Los estadísticos de la densidad básica para las especies estudiadas en el noroeste del Estado de Durango, México.

lo que puede considerarse, de acuerdo con Echenique y Plumptre (1994) como una madera altamente pesada (Tabla 2). El valor promedio estimado de la densidad de la madera en este género es mayor al registrado por Nájera *et al.* (2005) para *Quercus laeta* de la región centro sur de la Sierra Madre Occidental del estado de Durango, México. Estos investigadores midieron un promedio de 0,68 g cm^{-3}. Los estadísticos estimados para esta especie se encuentran dentro del rango de valores mencionados en la literatura de la clasificación de la madera de acuerdo con su densidad (Echenique y Díaz, 1972).

Diferencias de la densidad básica entre la albura y duramen

La densidad básica resultó ser estadísticamente igual cuando se contrastaron los componentes albura y duramen, en los géneros *Pinus* ($P \geq F = 0{,}5409$) y *Quercus* ($P \geq F = 0{,}0526$). Es decir, las probetas se pueden obtener en estos géneros independientemente del componente de la madera, en la albura o el duramen. Para esto se recomienda seguir con las instrucciones descritas por Chavé (2002). La densidad tampoco varió estadísticamente entre los componentes albura y duramen y la altura relativa de la troza en el género *Quercus* ($P > F = 0{,}2243$). Esto concuerda con el reporte de Pearson y Williams (1952) y Parolin (2002), de que las variaciones entre algunas especies de los árboles son más significativas que la variación dentro del mismo árbol.

Sin embargo, la densidad básica del duramen cambia con la altura relativa en las especies de pino estudiadas ($P > F = 0{,}0001$) y se ajusta la tendencia a una línea recta con pendiente negativa ($r^2 = 0{,}30$ y $S_x = 0{,}06$). Es decir, la densidad básica disminuye conforme aumenta la altura relativa del árbol. Por ejemplo, esta adquiere un valor de 0,46 g cm^{-3} cuando la altura relativa es de 10% y disminuye hasta 0,41 g cm^{-3} cuando la altura relativa del árbol es 100%. Por ejemplo, en un árbol que mide 13 m de alto, existe una reducción de 10% en la densidad cuando la probeta se toma a 1,3 m, que en contraste a cuando se toma a 11,7 m. Esta variación hace que un fuste con 1 m^3 de madera posea o 460 kg o 410 kg, con una diferencia de 50 kg que cuando se multiplica por los árboles que componen un bosque esta diferencia aumente notoriamente.

La relación entre la densidad básica promedio de la madera y la altura relativa para el duramen de especies del género

Tabla 2. Densidad básica promedio para los géneros *Pinus* y *Quercus* en el Norte de Durango, México.

Género	*Valor máximo (g cm^{-3})*	*Valor mínimo (g cm^{-3})*	*Promedio (g cm^{-3})*	*DS (g cm^{-3})*	*IC (g cm^{-3})*
Pinus	0,52	0,40	0,47	0,05	0,05
Quercus	0,86	0,61	0,77	0,11	0,02

donde: g cm^{-3} = gramos sobre centímetros cúbicos; DS= desviación estándar; IC= intervalo de confianza.

Pinus (*P. arizonica*, *P. durangensis*, *P. engelmannii*, *P. teocote*, *P.cooperi* y *P. leiophylla*) del norte del estado de Durango, México, se presenta en la figura 5. La ecuación que describe la línea recta de la tendencia, cuando se integra para estimar el promedio, la desviación estándar e intervalo de confianza resultan en: 0,222H; 0,044H y 0,015H, respectivamente. Esta información indica que la densidad básica del duramen se puede determinar a alturas relativas con un intervalo de 0,222H ± 0,015H. Es decir, para árboles de 10 m, 15 m, 20m o 25 m de altura, la probeta debe de tomarse a 2,2 (0,15); 3,3 (0,22); 4,4 (0,30) o 5,5 (0,37) metros, respectivamente. Solo cuando los árboles tienen una altura de 6 m, la probeta puede tomarse a 1,3 m.

La relación entre la densidad básica promedio de la madera y la altura relativa para la albura de especies del género *Pinus* (*P. arizonica*, *P. durangensis*, *P. engelmannii*, *P. teocote*, *P.cooperi y P. leiophylla*) del norte del estado de Durango, México se presenta en la figura 6. La densidad básica de la albura cambia con la altura relativa en las especies de pino estudiadas (P > F= 0,0001) y se ajusta la tendencia a una línea recta con pendiente negativa (r^2 = 0,36 y S_x = 0,06). En árboles de 13 m de altura, la densidad básica de la albura cambia desde 0.493 g cm^{-3} cuando la probeta se toma a 1,3 m hasta 0.433 g cm^{-3} cuando la probeta se toma a 11,7 m. Es decir, existe una reducción de 12% en el valor de la densidad básica cuando se toma a 11,7 m con respecto a aquella medida a 1,3 m.

La ecuación que describe la línea recta de la tendencia, cuando se integra para estimar el promedio, la desviación estándar e intervalo de confianza resultan en: 0,225H; 0,043H y 0,015H, respectivamente. Esta información indica que la densidad básica de la albura se puede determinar a alturas relativas con un intervalo de 0,225H ± 0,015H. Es decir, para árboles de 10 m, 15 m, 20 m o 25 m de altura, la probeta debe de colectarse a

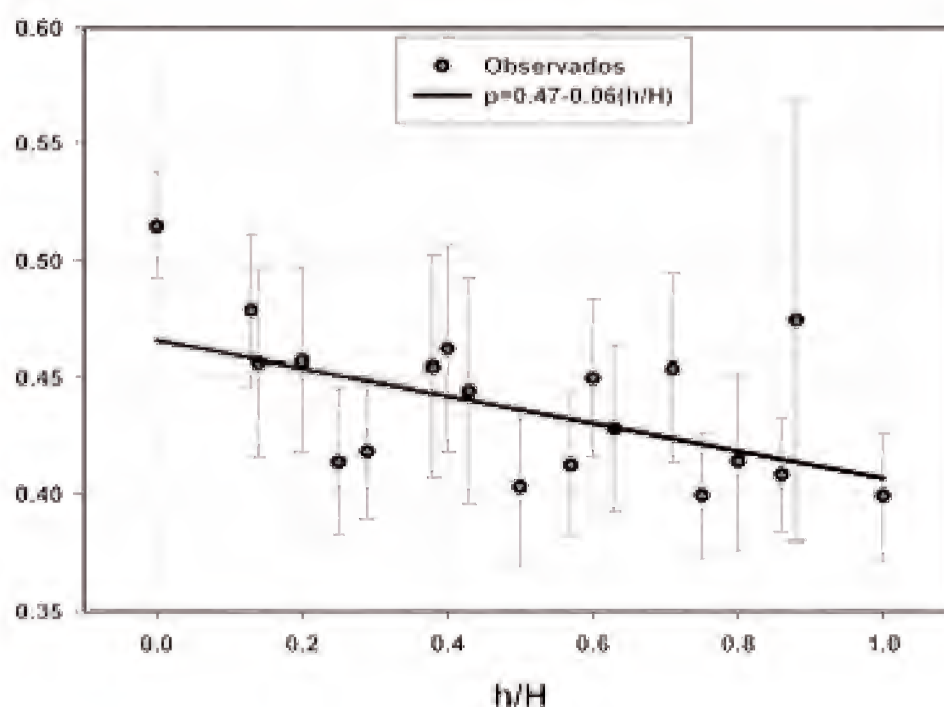


Figura 5. Relación entre la densidad promedio y la altura relativa para el duramen de especies de *Pinus* (*P. arizonica*, *P. durangensis*, *P. engelmannii*, *P. teocote*, *P.cooperi* y *P. leiophylla*) del norte del Estado de Durango, México.

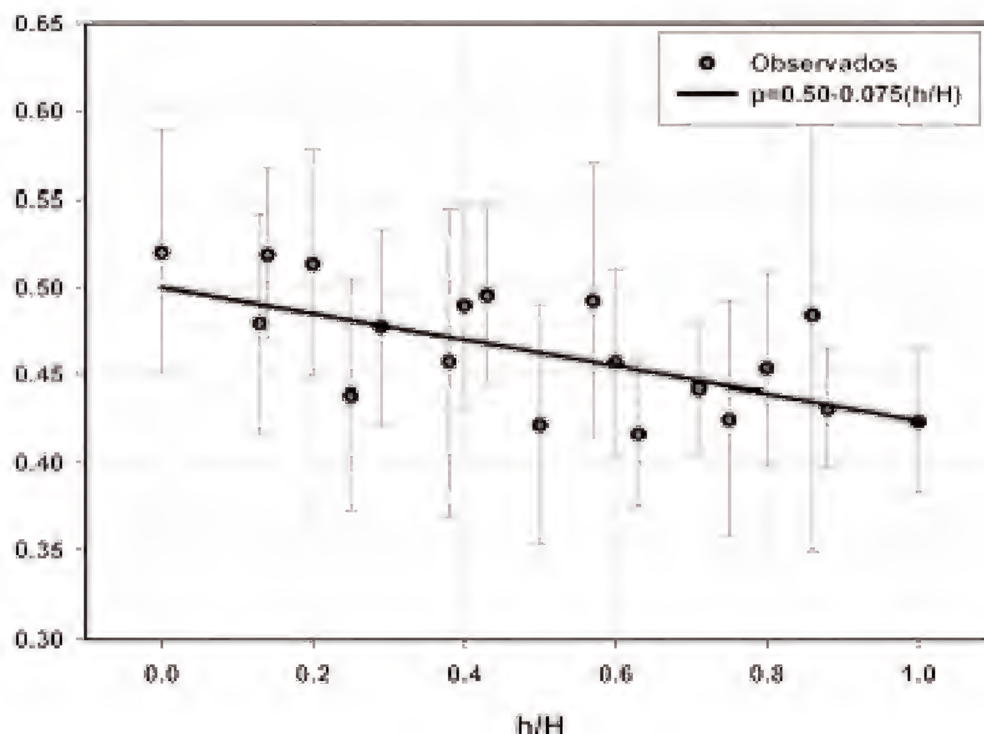


Figura 6. Relación entre la densidad promedio y la altura relativa para la albura de especies del género *Pinus* (*P. arizonica, P. durangensis, P. engelmannii, P. teocote, P.cooperi* y *P. leiophylla*) del norte del Estado de Durango, México.

2,25 (0.15); 3,37 (0.22); 4,5 (0,30) o 5,62 (0,37) metros, respectivamente. Solo cuando los árboles tienen una altura de 6 m, la probeta puede tomarse a 1,3 m.

Las líneas rectas que describen la relación ρ *vs* h/H para la albura y el duramen en el género *Pinus* no se diferencian estadísticamente, de acuerdo con el análisis de covarianza (P > F = 0,58). Por esta razón, se deriva finalmente una sola ecuación, con la siguiente función matemática: $\rho = [0,487 - 0,0697(h/H)]$; $r^2 = 0,32$; P = 0,0001. Esta ecuación posee interpretaciones físicas, 0,487 es la densidad básica promedio esperada para estas especies a la base del fuste. La pendiente negativa de la ecuación explica la reducción relativa de la densidad de la madera vieja en contraste con la madera nueva, así como también la proporción de albura y duramen. Es decir, a mayor altura del árbol, el contenido relativo de madera nueva y de albura son mayores que en la base del fuste.

CONCLUSIONES

El valor promedio encontrado en la densidad básica del género *Pinus* fue de 0,47g cm^{-3} ± 0,04 g cm^{-3}, considerándose como una madera medianamente pesada, mientras que el valor promedio encontrado en el *Quercus* fue de 0,77 g cm^{-3} ± 0,02 g cm^{-3}, considerándose como una madera altamente pesada, de acuerdo con la clasificación vigente. En general, la densidad básica resultó ser estadísticamente igual entre los componentes albura y duramen, en los géneros *Pinus* y *Quercus.* Tampoco la altura relativa del árbol fue una fuente de variación importante en el género *Quercus.* Sin embargo, se encontraron diferencias estadísticas en la densidad básica entre los componentes de albura y duramen y la altura relativa de la troza en el género *Pinus.* Cuando se desarrolla una ecuación que define el cambio de la densidad básica con la altura relativa del árbol, se recomienda extraer las probetas para determinar este componente tecnológico a una

altura relativa promedio con un intervalo de entre 0,21H m a 0,24H m. Solo en árboles con 6 m de altura, la probeta se debe extraer a 1,3 m.

REFERENCIAS

Chavé, J. 2002. Medición de densidad de madera en árboles tropicales. Manual de campo. PAN-AMAZONIA. 7 p.

Chavé, J., C. Andalo, S. Brown, M.A. Cairns, J.Q. Chambers, D. Eamus, H. Fölster, F. Fromard, N. Higuchi, T. Kira, J.P. Lescure, B.W. Nelson, H. Ogawa, H. Puig, B. Riéra y T. Yamakura. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. Oecologia 145(1):87-99.

Daniel, T.W., J.A. Helms, y F.S. Baker. 1982. Principios de silvicultura. McGraw-Hill. México. 492 p.

Echenique-Manrique. R. y V. Díaz-Gómez. 1972. Algunas características tecnológicas de la madera de 11 especies mexicanas. Bol. Téc. Num. 27. INIF. México. 71 p.

Echenique-Manrique. R. y R. Plumptre. 1994. Guía para el uso de maderas de México y Belice. Universidad de Guadalajara. Consejo Británico. Laboratorio de Ciencia y Tecnología de la Madera. Universidad de Oxford. 196 p. ISBN 968-895-517-5.

Fearnside, P.M. 1997. Wood density for estimating forest biomass in Brazilian Amazon. Forest Ecology and Management 90(1):59-89.

Hocker Jr., H.W. 1984. Introducción a la biología forestal. AGT Editor, S.A. México. 446 p.

INEGI (Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática). 2002. Anuario Estadístico del Estado de Durango. Aguascalientes, México. 685 p.

Jenkins, J.C., R.A. Birdsey y Y. Pan. 2001. Biomass and NPP estimation for the mid-Atlantic region (USA) using plot-level forest inventory data. Ecological Applications 11:1174-1193.

López L., M. y S. Valencia M. 2001. Variación de la densidad relativa de la madera de *Pinus greggii* Engelm. del norte de México. Madera y Bosques 7(1):37-46.

Miles, P.D. y W.B. Smith. 2009. Specific gravity and other properties of wood and bark for 156 tree species found in North America. USDA FS. Northern Research Station. Research Note NRS-38. Delware, OH. EUA.

Mohren, F. y K. Klein Goldewijkt. 1994. CO_2 fix model. Institute of Forestry and Nature Research. Wageningen, Países Bajos.

Nájera, L., V. A. Zacarías, G. Méndez y L. Graciano. 2005. Propiedades físicas y mecánicas de la madera en *Quercus laeta* Liemb. de El Salto, Durango. Ra Ximhai, septiembre-diciembre, vol. 1, núm. 3. Universidad Autónoma Indígena de México Mochicahui, El Fuerte, Sinaloa. p. 559-576.

Návar, J., N. González, y J. Graciano. 2005. Carbon sequestration by forest plantations of Durango Mexico. Madera y Bosques 11(2): 15-34.

Návar, J., 2009a. Allometric equations for tree species and carbon stocks for

forests of northwestern Mexico. Forest Ecology and Management 257:427-434. doi:10.1016/j.foreco.2008.09.028

Návar, J., 2009b. Biomass component equations for Latin American species and groups of species. Annals of Forest Science 66:208-216.

Návar, J. 2009c. Manual de Métodos Estadísticos. Facultad de Ciencias Forestales-UANL. Linares, N.L., México.

Návar, J. 2010. Methods of Assessment of Aboveground Tree Biomass. *In*: Biomass, M. Momba and Faizal Bux, (eds.). 202 p. InTech. Rijeka, Croatia.

Návar, J. 2011. Probabilidad y estadística aplicadas al manejo de recursos naturales y medio ambiente. McGraw Hill, México, D.F.

Parolin, P. 2002. Radial gradients in wood specific gravity in trees of Central Amazonian floodplains. IAWA Journal 23:449-457.

Pearson, R. y Williams, J. 1952. Review of methods for sampling of timber. Forest Products Journal 8(10): 263-268.

Pérez, O.F., R. Castro y O. Sadaaki. 2000. Índices de Calidad de Madera en *Pinus taeda* de Rivera para la optimización en el uso final. Proyecto de Tecnología de Ensayo de Productos Forestales LATU-JICA (1998-2003). Informe de Investigación núm. 2.

Van Buijtenen, J.P. 1963. Inheritance of wood properties and their relation to growth rate in *Pinus taeda*. World Consultation on Forest Genetics and Tree Improvement. FAO. Roma. 13 p.

Zobel, B.J. y J.P. Van Buijtenen. 1989. Word variation, its causes and control. Springer-Verlag. 363 p.

Zobel, B.J. y J.T. Talbert. 1988. Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales. Limusa. México. 545 p.

Manuscrito recibido el 13 de enero de 2011.
Aceptado el 12 de marzo de 2012.

Este documento se debe citar como: Silva-Arredondo, F.M. y J.J. Návar-Cháidez. Estimación de la densidad de madera en árboles de comunidades forestales templadas del norte del estado de Durango, México. *Madera y Bosques* 18(1):77-88.

MADERA Y BOSQUES Vol. 18 Núm. 1
Se terminó de imprimir en el mes de abril de 2012
en los talleres de Tavera Hermanos, S.A. de C.V.
Av. Lázaro Cárdenas 3052. Col. Chapultepec Sur.
CP 58260, Morelia, Michoacán.

La edición consta de 300 ejemplares
más sobrantes para reposición.



Madera y Bosques 18(1), 2012

CONTENIDO

3 **Editorial**

Artículos de investigación

7 Caracterización dasométrica e índice de sitio en plantaciones de caoba en Tabasco, México
Guadalupe Pérez González, Marivel Domínguez-Domínguez, Pablo Martínez-Zurimendi y Jorge D. Etchevers Barra

25 Modelos de biomasa aérea y foliar en una plantación de pino de rápido crecimiento en Oaxaca
Gerardo Rodríguez-Ortiz, Héctor M. De Los Santos-Posadas, Víctor A. González-Hernández, Arnulfo Aldrete, Armando Gómez-Guerrero y Aurelio M. Fierros-González

43 La madera de cinco especies de *Zanthoxylum* L. (Rutaceae) con distribución en México
Fernanda Arenas Flores, Agustina Rosa Andrés-Hernández, Teresa Terrazas y Carlos Castañeda

57 El impacto del huracán Dean sobre la estructura y composición arbórea de un bosque manejado en Quintana Roo, México
Angélica Navarro-Martínez, Rafael Durán García y Martha Méndez-González

77 Estimación de la densidad de madera en árboles de comunidades forestales templadas del norte del estado de Durango, México
Flor María Silva-Arredondo y José de Jesús Návar-Cháidez

Guía de autores